This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06637377 4

PRESENTED BY
WESTINGHOUSE CHURCH, KERR & CO.

AMERICAN SOCIETY
MAY 16 1916
OF CIVIL ENGINEERS.
NEW YORK.

TRAITÉ PRATIQUE D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

This ed. out in May 4.22

Have 1885

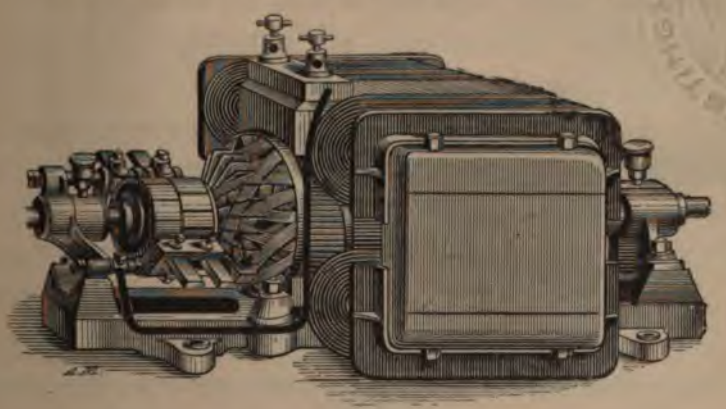
UNITÉS ET MESURES
PILES ET MACHINES ÉLECTRIQUES. — ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE
TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE LA FORCE
GALVANOPLASTIE ET ÉLECTRO-MÉTALLURGIE. — TÉLÉPHONIE

PAR

E. CADIAT
INGÉNIEUR DES ARTS ET MANUFACTURES

L. DUBOST
ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

QUATRIÈME ÉDITION AVEC 257 FIGURES DANS LE TEXTE



PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MÊME MAISON A LIÈGE, RUE DES DOMINICAINS, 7

1892

Tous droits réservés.

59973A

Ha
238

PRÉFACE

Encouragés par l'accueil favorable que le public nous a fait jusqu'à présent, nous faisons paraître une quatrième édition de notre *Traité pratique d'électricité industrielle*. Le plan que nous avions adopté dans le principe n'a reçu aucune modification et la distribution des chapitres est restée la même; mais l'ouvrage s'est enrichi de tous les progrès qui se sont accomplis depuis la publication de la dernière édition. Limités par l'espace, nous avons retranché de nos premiers ouvrages tous les détails qui ne présentaient pas un intérêt suffisant au point de vue industriel, et nous les avons remplacés par des faits nouveaux et des renseignements pratiques. C'est ainsi, par exemple, que les anciennes descriptions d'appareils, de machines, d'installations, auxquelles nous avions autrefois donné un grand développement, ont été réduites à leur plus simple expression et qu'une large part a été ménagée aux intéressantes questions qui concernent les stations centrales.

La science électrique faisant des progrès chaque jour et les applications industrielles se multipliant sans cesse, le nombre des faits à enregistrer est presque infini. Avec le cadre que nous nous sommes imposé, nous avons dû sacrifier bien des

.L.H.
.482

détails et nous nous sommes contentés d'indiquer les grandes lignes en faisant ressortir les principes généraux. Nous avons fait notre possible pour condenser sous le plus petit volume toutes les découvertes les plus récentes tant en France qu'à l'étranger et, chaque fois que nous l'avons pu, nous avons appuyé par des exemples et des chiffres d'expérience les résultats théoriques des calculs. Nous espérons qu'avec les renseignements que nous fournissons, un ingénieur pourra sans difficulté dresser un devis d'installation et résoudre la plupart des problèmes qui se présentent dans les applications de l'électricité.

L'ÉLECTRICITÉ
INDUSTRIELLE

PREMIÈRE PARTIE
PRINCIPES GÉNÉRAUX, UNITÉS ET MESURES

CHAPITRE PREMIER
PRINCIPES GÉNÉRAUX

1. Définitions. — Lorsqu'on répète l'expérience connue de la pile de Volta et qu'on réunit par un fil métallique les extrémités supérieures d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc plongeant sans se toucher dans de l'eau acidulée, ce fil devient le siège d'actions spéciales insensibles au premier abord, mais cependant faciles à observer. Il suffit, par exemple, d'approcher de ce fil une aiguille aimantée, pour que celle-ci abandonne sa position d'équilibre et subisse une déviation bien marquée.

Ces actions sont dues à un phénomène qui a reçu le nom de *courant électrique*. On dit que le fil métallique est parcouru par un courant, allant de la lame cuivre à la lame zinc, ou, en d'autres termes, du *pôle positif* de la pile (lame cuivre) au *pôle négatif* (lame zinc). Cette expression, adoptée au moment où l'on admettait qu'il y avait transport d'électricité le long du fil, a été consacrée par l'usage et on l'a conservée sans rien préjuger sur le mode d'accomplissement du fait ainsi désigné.

2. — Le courant électrique, voilà donc l'effet produit. Quelle en est la cause? Nous ne pouvons l'indiquer pour le moment, et nous en constatons simplement l'existence. Cette cause a été appelée *force électromotrice*.

Considérons maintenant deux points quelconques du conducteur métallique. Un courant parcourt le fil qui les réunit, comme nous pouvons le vérifier au moyen de l'aiguille aimantée. Une comparaison avec les phénomènes calorifiques va nous permettre de mieux faire comprendre le terme qui désigne la cause du courant.

Supposons que deux corps, possédant des températures inégales, soient mis en présence, l'air remplaçant le fil métallique de l'expérience précédente. Dans ces conditions, il y a transport de chaleur d'un de ces corps vers l'autre, et ce transport est dû à leur différence de température. Par analogie, nous dirons qu'il y a courant entre les deux points de notre conducteur parce qu'ils n'ont pas la même température électrique ou, en d'autres termes, parce qu'ils n'ont pas le même *potentiel*, ou encore parce qu'il existe entre eux une *différence de potentiel*.

L'hydrostatique nous présente aussi un phénomène semblable. Si l'on considère une conduite d'eau inclinée, il y a écoulement du liquide par suite de la différence de niveau entre les deux bouts de la conduite. De même en électricité on dira que le courant est produit parce que les deux points ne sont pas au même niveau électrique ou qu'ils n'ont pas le même *potentiel*,

Le *potentiel* peut donc être défini comme la température électrique, ou encore comme la hauteur de niveau électrique. Lorsque deux points ayant des potentiels différents se trouvent réunis par un conducteur, la différence de ces potentiels détermine la production d'un courant.

En résumé, la cause qui produit le courant électrique dans un circuit fermé s'appelle *force électromotrice* quand on considère ce circuit dans son ensemble ; si l'on n'examine qu'une portion du circuit comprise entre deux points déterminés, cette cause prend le nom de *différence de potentiel* de ces deux points.

3. — Les deux pôles de la pile une fois mis en communication,

le courant électrique prend naissance, et il s'établit un état permanent dans lequel toutes les sections du conducteur sont traversées par les mêmes quantités d'électricité dans le même temps. La *quantité* d'électricité n'a d'ailleurs pas besoin d'être définie. Elle est analogue à la quantité de liquide débitée par une conduite d'eau.

On appelle *intensité* la quantité d'électricité qui passe dans l'unité de temps. C'est cette intensité qui représente la grandeur de l'effet produit par la force électromotrice.

Soient I l'intensité, Q la quantité d'électricité et t le temps, on a

$$I = \frac{Q}{t}.$$

L'intensité est pour un courant ce qu'est le débit pour une conduite.

4. — Revenons à la comparaison d'hydrostatique que nous avons citée plus haut. Le frottement de l'eau sur les parois du tuyau incliné tend à retarder l'écoulement du liquide. Nous rencontrons encore un phénomène analogue dans le courant électrique ; c'est l'obstacle opposé par le conducteur au passage de l'électricité ou la *résistance*.

Cette résistance varie, d'ailleurs, avec la nature et les dimensions du conducteur, de même que le frottement de l'eau est plus ou moins considérable suivant la matière et les dimensions du tuyau.

5. Loi de Ohm. — Les trois éléments, force électromotrice ou différence de potentiel, intensité, résistance, sont liés par une loi fort importante, qui a été formulée par Ohm de la manière suivante :

Dans un circuit fermé, l'intensité d'un courant est proportionnelle à la force électromotrice et inversement proportionnelle à la résistance du circuit.

En désignant par I l'intensité, par E la force électromotrice et par R la résistance, la loi de Ohm a pour expression :

$$I = \frac{E}{R}.$$

On conçoit, en effet, que le débit du courant dans l'unité de temps, c'est-à-dire son intensité, soit d'autant plus grand que la force électromotrice est plus élevée et que la résistance opposée par le conducteur est plus faible.

Si l'on ne considère qu'une portion limitée d'un circuit comprise entre deux points déterminés de potentiels V_1 et V_2, la loi de Ohm est encore applicable ; mais il faut introduire dans la formule la différence de ces potentiels et la résistance r de la portion considérée du circuit. On a alors :

$$I = \frac{V_1 - V_2}{r}.$$

6. Lois de Kirchhoff. — La loi de Ohm permet de résoudre les problèmes que l'on rencontre dans le cas d'un circuit simple, c'est-à-dire lorsque le courant n'a qu'un seul chemin à parcourir. Il n'en est plus de même si ce courant peut suivre plusieurs directions pour aller d'un pôle de la pile à l'autre, ou, suivant l'expression employée, s'il rencontre des *dérivations*. Il se divise alors en plusieurs courants de valeur moindre qui prennent le nom de courants *dérivés*. Ces courants dérivés sont soumis aux deux lois suivantes formulées par Kirchhoff :

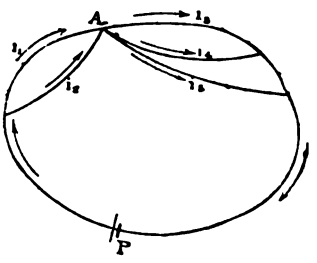


Fig. 1.

1° *En un point de croisement de plusieurs conducteurs faisant partie de réseaux traversés par des courants, la somme algébrique des intensités qui traversent ces conducteurs est nulle.*

Cette somme algébrique s'obtient en considérant comme positifs les courants qui se dirigent vers le point en question A (fig. 1), et comme négatifs ceux qui s'en éloignent :

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 - i_5 = 0.$$

2° *Pour toute figure fermée d'un système de conducteurs, la somme algébrique des produits des intensités par les résistances est égale à la somme algébrique des forces électromotrices.*

Pour déterminer les signes des forces électromotrices et des in-

tensités, on suppose que l'on parcourt le périmètre de la figure fermée ; on donne le signe + aux courants qui marchent dans le même sens et aux forces électromotrices qui les produisent. Les courants de sens contraire et les forces électromotrices auxquelles ils sont dus sont négatifs.

Ainsi, dans le circuit AEBE′ comprenant les deux piles E et E′ (fig. 2), nous avons, en adoptant les mêmes notations que pour la loi de Ohm,

$$E - E' = IR - I'R';$$

et dans le circuit composé de la pile E et du fil AB

$$E = IR + ir.$$

7. Résistance d'un conducteur. — Nous avons dit plus haut (§ 4) que la résistance d'un conducteur métallique variait avec ses

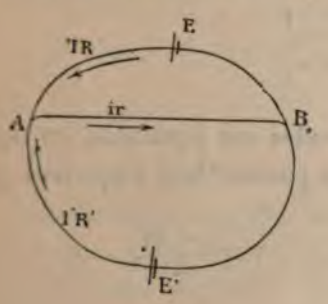


Fig. 2.

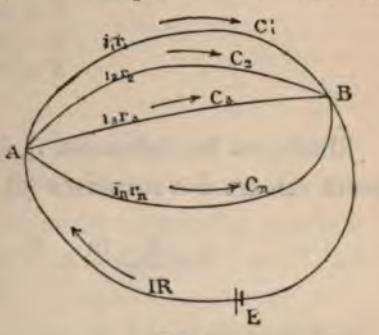


Fig. 3.

dimensions. L'expérience prouve que cette résistance est proportionnelle à la longueur du conducteur et inversement proportionnelle à sa section.

Elle dépend aussi de sa nature, et son expression renferme un coefficient, particulier à chaque corps, auquel on donne le nom de *résistance spécifique*. Cette résistance spécifique sera étudiée plus loin (§ 9), et nous ne faisons que l'indiquer à présent.

Si donc on appelle R la résistance d'un conducteur, l sa longueur, s sa section et ρ sa résistance spécifique, on a

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

8. Résistance des circuits dérivés. — La formule précédente

n'est pas suffisante dans le cas des circuits dérivés, lorsqu'on veut chercher la résistance totale offerte par leur ensemble.

Considérons un nombre n de conducteurs dérivés (fig. 3) entre les points AB du circuit AEB. Soient r_1, r_2... r_n les résistances de chacun d'eux, i_1, i_2... i_n les intensités des courants qui les traversent. Soient R la résistance et I l'intensité en AEB, et E la force électromotrice de la pile. La première loi de Kirchhoff, appliquée au point A, nous donne

$$I - i_1 - i_2 \ldots\ldots - i_n = 0. \qquad (1)$$

En vertu de la deuxième loi, nous pouvons écrire dans chacun des circuits EAC_1B, EAC_2B,... EAC_nB :

$$\left.\begin{array}{l} E = IR + i_1 r_1 \\ E = IR + i_2 r_2 \\ E = IR + i_n r_n \end{array}\right\} \qquad (2)$$

Éliminons les intensités $i_1, i_2 \ldots i_n$ entre ces équations, en tirant leurs valeurs des équations (2) et les portant dans l'équation (1) :

$$I = \frac{E - IR}{r_1} + \frac{E - IR}{r_2} + \ldots\ldots \frac{E - IR}{r_n}.$$

Faisons passer tous les termes en I dans le premier membre :

$$I\left[1 + R\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots \frac{1}{r_n}\right)\right] = E\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r^2} + \ldots + \frac{1}{r_n}\right)$$

$$I\left[R + \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots \frac{1}{r_n}}\right] = E$$

$$I = \frac{E}{R + \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}}}. \qquad (3)$$

En vertu de la loi de Ohm, cette formule nous indique que, si nous voulons remplacer l'ensemble des n dérivations placées entre les points A et B par un seul conducteur de résistance égale

à leur résistance totale, sans changer l'intensité I du courant, la résistance R′ de ce conducteur sera donnée par

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}}. \tag{4}$$

En d'autres termes, la résistance totale des n dérivations est égale à l'inverse de la somme des inverses des résistances de chaque dérivation.

Dans le cas particulier où l'on n'a que deux circuits dérivés, la formule (4) devient

$$R' = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \tag{5}$$

Enfin, si nous supposons que les n circuits dérivés soient d'égale résistance, nous avons :

$$R' = \frac{1}{\frac{n}{r}}$$

ou

$$R' = \frac{r}{n}.$$

Ces diverses formules nous fournissent quelques conclusions générales. Nous voyons, au moyen de l'équation (5), que l'établissement d'une dérivation entre deux points d'un circuit diminue la résistance totale et, par suite, d'après la loi de Ohm, augmente l'intensité du courant entre la pile et les points de dérivation. Par contre, il y a diminution de l'intensité dans la partie du circuit primitif qui reste comprise entre les points de dérivation.

Nous trouvons aussi, d'après les équations (2), que les intensités des courants dérivés sont en raison inverse des résistances des dérivations. Il résulte de là que, lorsque ces résistances sont égales, les intensités sont égales dans chaque dérivation.

9. Résistance spécifique et conductibilité. — La *résistance spécifique* d'un corps, qui, comme nous l'avons vu (§ 7), entre dans l'expression de la résistance d'un conducteur, est la résistance présentée par un cube de cette substance ayant pour côté l'unité de longueur, et mesurée entre deux faces opposées.

L'unité de longueur adoptée étant le centimètre, ainsi que nous le dirons plus loin, la résistance spécifique d'un corps est celle qui est produite entre les deux faces opposées d'un centimètre cube de ce corps.

La *conductibilité* d'un corps est l'inverse de sa résistance spécifique; on l'obtient en divisant l'unité par le chiffre qui représente la résistance spécifique.

Connaissant la résistance absolue R d'un conducteur dont on a la longueur et la section, on détermine sa résistance spécifique ρ au moyen de la formule que nous avons donnée (§ 7) et d'où l'on tire

$$\rho = R \frac{s}{l}.$$

10. — La conductibilité des métaux varie essentiellement avec la nature de ces métaux, comme le prouve la table suivante des coefficients de conductibilité. Ces chiffres résultent d'une série d'expériences entreprises par M. Lazare Weiller. Ils diffèrent sensiblement des nombres précédemment adoptés, et qui étaient dus à M. E. Becquerel et à M. Mathiessen. Comme l'a fait remarquer M. Weiller, les différences proviennent des difficultés qu'on éprouvait autrefois à se procurer les métaux à l'état de pureté absolue, et des défauts que présentaient à cette époque les méthodes et les appareils des mesures électriques.

Argent pur	100
Cuivre pur	100
Bronze silicieux télégraphique	98
Alliage cuivre et argent à 50 p. 100	88,65
Or pur	78
Aluminium pur	54,2
Bronze silicieux téléphonique	35
Zinc pur	29,9
Bronze phosphoreux téléphonique	29
Alliage or et argent à 50 p. 100	16,12
Fer de Suède	16
Etain pur de Banca	15,45
Acier Siemens	12
Platine pur	10,6
Plomb pur	8,88
Bronze à 20 p. 100 d'étain	8,4
Nickel pur	7,89
Antimoine	3,88

A cette liste il faut encore ajouter le mercure, dont la conductibilité est de 1,61, d'après les recherches de M. Edmond Becquerel.

Les conductibilités indiquées dans le tableau précédent sont rapportées à celles d'un fil d'argent pur de 1 millimètre de diamètre.

La conductibilité des métaux dépend d'ailleurs de leur état moléculaire et de leur température. Les métaux recuits sont plus conducteurs que les métaux écrouis; ainsi, d'après M. Becquerel, le coefficient de l'argent écroui n'est que 93,44.

Comme on le voit par les chiffres qui précèdent, la pureté du métal a aussi une grande influence, et la résistance spécifique d'un alliage est bien supérieure à celle des métaux qui le composent. C'est ce qui explique pourquoi le cuivre et le fer du commerce sont plus résistants que le cuivre et le fer purs. C'est aussi la raison qui fait rechercher pour les conducteurs électriques les métaux dans le plus grand état de pureté possible.

La résistance spécifique des métaux croît avec la température, sauf pour quelques alliages qui ont un maximum de densité et dans lesquels la résistance décroît quand on dépasse la température correspondant à ce maximum. La formule suivante, due à M. Mathiessen, donne la variation de la résistance des métaux avec la température au moyen des coefficients a et b déterminés par l'expérience. Soient R la résistance à $t°$, r la résistance à 0°.

$$R = r(1 + at + bt^2).$$

Le coefficient b est négatif pour certains métaux. Les valeurs de a et de b sont :

	a	b
Pour les métaux purs.	0,00384	+ 0,00000126
Pour le mercure	0,0007485	— 0,000000398
Alliage 2 parties d'or et 1 d'argent. . .	0,0006999	+ 0,000000152
Argent allemand (maillechort).	0,0004433	— 0,000000062

On trouvera à la fin du volume des tableaux indiquant les résistances des différents métaux et permettant de résoudre la plupart des problèmes relatifs aux diamètres des conducteurs.

11. — La résistance spécifique des corps non métalliques est généralement plus élevée que celle des corps métalliques. Pour

les dissolutions acides et salines, elle diminue avec la température, contrairement à ce qui arrive pour les métaux.

On emploie dans ce cas la formule

$$R = \frac{r}{1 + at}.$$

dans laquelle le coefficient a est, par exemple,

Pour la solution de sulfate de cuivre.	0,0286
— la solution de sulfate de zinc.	0,0223
— l'acide azotique	0,0263

La conductibilité de ces dissolutions varie aussi avec le degré de concentration, et, dans quelques cas, il y a un maximum de conductibilité correspondant à une concentration déterminée. Ainsi, pour l'acide sulfurique étendu d'eau, ce maximum correspond à la densité 1,25; pour le sel marin, il a lieu quand la dissolution contient 24 p. 100 de sel. Au contraire, pour les dissolutions de sulfate de cuivre et de sulfate de zinc, la résistance diminue quand la concentration augmente. Du reste, les lois des variations de conductibilité des mélanges sont encore mal définies.

Voici quelques chiffres donnés par M. Becquerel qui indiquent les conductibilités des principales solutions employées dans les applications électriques, par rapport à l'argent pur représenté par 100.000.000 :

ARGENT PUR A 0 DEGRÉ 100.000.000

Eau acidulée au $^1/_{10}$ avec de l'acide sulfurique. . .	76,34
Acide azotique à 36 degrés	105,41
Solution saturée de sulfate de cuivre.	7,25
— concentrée de chlorure de sodium. . . .	42,24
— saturée de sulfate de zinc.	7,79

Ces déterminations ont été faites à une température voisine de 20 degrés.

12. — La résistance des corps solides non métalliques est généralement très grande; elle varie avec la température et leur état physique.

La résistance du verre et de la porcelaine est presque infinie à

la température ordinaire; elle diminue beaucoup lorsque la température s'élève.

La résistance de la gutta-percha est très variable suivant sa qualité et sa pureté; elle dépend, pour un même échantillon, de la température et de la pression extérieure. Un fait assez curieux c'est que la résistance de la gutta-percha augmente avec la durée du courant qui la traverse. On attribue ce fait à une sorte d'orientation des molécules de la gutta.

Cette propriété qu'offrent certains corps, tels que le verre, la gutta-percha, la soie, d'être mauvais conducteurs, a été utilisée en électricité pour *isoler* les fils métalliques qui sont traversés par les courants électriques. Ces substances servent aussi dans la construction des machines et des appareils pour empêcher les contacts des parties conductrices.

13. Charge et capacité électriques. — Lorsque, par un fil métallique, on réunit un corps conducteur avec un point quelconque d'un circuit électrique, un des pôles d'une pile, par exemple, on détermine dans ce fil la production d'un courant. Mais ce courant ne dure qu'un instant infiniment petit, et si l'on mesure ensuite le potentiel du corps en question, on le trouve égal à celui du pôle de la pile.

Il y a donc eu transport d'électricité de ce pôle vers le corps; en d'autres termes, ce corps a reçu une certaine quantité d'électricité à laquelle on a donné le nom de *charge*.

Cette quantité d'électricité dépend de la nature et de la forme du corps. Pour pouvoir comparer sous ce rapport les différentes substances, on a donc été obligé d'introduire un nouvel élément. C'est la *capacité* électrique ou la quantité d'électricité qu'il faut fournir à un corps pour élever son potentiel d'une unité. Cette capacité est analogue à la capacité calorifique ou chaleur spécifique qui, comme on le sait, est la quantité de chaleur nécessaire à un corps pour que sa température soit augmentée d'un degré.

La formule suivante relie la capacité électrique C, la charge Q et le potentiel E

$$C = \frac{Q}{E}.$$

14. Rôle de la terre dans les communications électriques. — Nous venons de voir qu'un courant électrique ne pouvait se produire à l'état permanent dans un circuit que quand ce circuit était *fermé*, c'est à dire ne présentait aucune solution de continuité. Ainsi, pour que le courant existe entre deux points A et B (fig. 4), il faut que ces deux points soient reliés entre eux : 1° par un premier conducteur APB comprenant la source P d'électricité ; 2° par un second fil AMB qui sert à fermer le circuit.

Cette règle n'est pas absolue, et le courant peut exister entre les deux points A, B sur le circuit APB, à la condition que ces points soient reliés à la terre. Le circuit fonctionne comme s'il était fermé sur lui-même. Dans ce cas, la terre remplace le second conducteur.

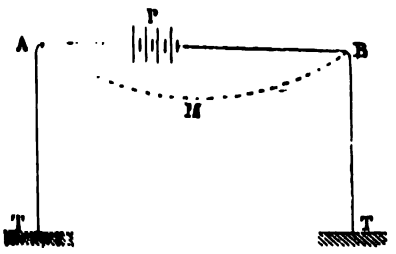


Fig. 4.

Cette remarque, faite dès l'année 1747 par le Dr Watson, ne fut mise en pratique que beaucoup plus tard, lors des premières applications de la télégraphie électrique ; mais elle eut alors une très grande utilité, car elle permit de supprimer un fil sur deux dans les lignes télégraphiques, et de réduire de moitié la dépense d'installation.

Quel rôle joue la terre dans ces transmissions électriques ? Deux opinions contraires ont été émises à ce sujet, dont la discussion serait peu intéressante et nous entraînerait beaucoup trop loin ; nous allons simplement les indiquer. Suivant les uns, la terre agit comme un simple conducteur de section considérable et, par suite, de faible résistance ; d'après les autres, qui sont peut-être les plus nombreux, le sol absorbe simplement les courants électriques.

Quoi qu'il en soit, cette propriété est très importante pour certaines applications de l'électricité où l'on a à établir des circuits assez longs.

Mais la terre présente une résistance à la pénétration et à la diffusion du courant ; pour la diminuer, la communication entre une ligne et le sol doit être faite au moyen d'une plaque métallique

fixée à l'extrémité de cette ligne et placée dans un terrain humide ; la grande surface de la plaque et l'humidité favorisent la transmission. Dans les villes, on peut, dans certains cas, se dispenser d'une pareille installation en reliant simplement la ligne à une conduite d'eau ou de gaz, lorsqu'il existe des canalisations souterraines pour leur distribution.

ACTIONS CHIMIQUES DES COURANTS

15. Électrolyse. — Supposons qu'on plonge dans de l'eau acidulée deux fils de platine respectivement reliés aux deux pôles d'une pile. On obtient ainsi un circuit électrique fermé ; le courant qui prend naissance traverse le liquide et le décompose, s'il a la force électromotrice nécessaire, et l'on voit apparaître des bulles d'oxygène sur un des fils et d'hydrogène sur l'autre.

Cette action chimique produite par le courant a reçu un nom particulier. On appelle *électrolyse* la séparation d'un corps composé en ses différents éléments, sous l'influence d'un courant électrique. Le corps soumis à cette action se nomme *électrolyte*. Les deux surfaces entre lesquelles l'action se produit sont les *électrodes*. L'électrode reliée au pôle positif se nomme *anode*, celle qui se rattache au pôle négatif est la *cathode*. Les éléments analogues à l'oxygène ou aux acides se rendent à l'électrode positive, les éléments analogues à l'hydrogène, aux métaux ou aux bases, se portent à l'électrode négative.

Pour qu'un corps composé soit électrolysable, il doit :

1° Être liquide,

2° Être conducteur de l'électricité.

En outre, chaque dissolution exige, pour être décomposée, une certaine force électromotrice minima qui dépend de l'affinité des corps dont elle est formée. Nous reviendrons sur cette question quand nous étudierons les piles et la galvanoplastie.

Si, au moyen de la chaleur, on amène à l'état de fusion un sel qui est solide à la température ordinaire, on peut le décomposer par l'électricité. Ainsi, en fondant du chlorure de plomb dans un tube en U et en plongeant dans chaque branche une électrode de [illegible]ne, on obtient du chlore d'un côté et du plomb du côté opposé.

En fondant du chlorure de sodium et en le traitant de la même façon entre deux électrodes de charbon, on peut obtenir du sodium métallique. Il existe un procédé pour la fabrication du potassium, du sodium et de l'aluminium basé sur ce principe; nous en parlerons dans l'électro-métallurgie.

16. Lois de Faraday. — Les lois suivantes ont été établies par Faraday pour les phénomènes électrolytiques :

1° *L'action chimique est identique en tous les points d'un même circuit.*

Quand on place dans un circuit à la suite l'un de l'autre des vases contenant le même électrolyte, on trouve que les quantités décomposées dans chaque bain sont égales pour le même temps.

2° *La quantité d'électrolyte décomposée en un temps donné est proportionnelle à l'intensité du courant.*

3° *Si, dans un même circuit, on place à la suite les uns des autres des bains de compositions différentes, les quantités de ces divers électrolytes décomposées en un même temps sont proportionnelles à leurs équivalents chimiques.*

On appelle *équivalent électro-chimique* d'un corps la quantité de cette substance libérée par le passage de la quantité d'électricité égale à l'unité. Nous reviendrons plus tard sur ce sujet.

17. Théorie de Grotthus et de Faraday. — Un courant produit, comme nous venons de le voir, une décomposition chimique lorsqu'il traverse une dissolution. Grotthus et Faraday ont donné l'explication suivante de ce phénomène électrolytique.

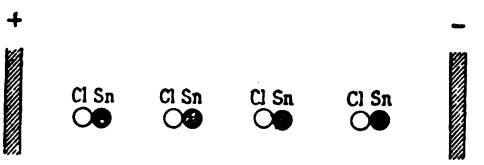


Fig. 5.

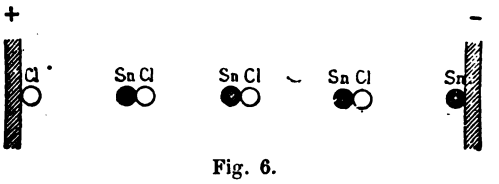


Fig. 6.

Quand on décompose une solution par l'électrolyse, on remarque que les éléments séparés par le courant n'apparaissent que sur les électrodes, comme si les molécules de liquide qui sont en contact avec les surfaces polaires

avaient seules subi la décomposition, le reste du bain n'ayant servi que de conducteur. Si l'on traite, par exemple, du chlorure d'étain, on voit apparaître du chlore au pôle positif et de l'étain au pôle négatif. On ne peut pourtant pas admettre que les molécules intermédiaires n'aient pas pris part à l'action. Grotthus a interprété ce phénomène de la façon suivante. Supposons que la figure 5 représente les molécules à l'état initial d'équilibre ; lorsque le courant passera, elles se sépareront et, chaque molécule d'étain venant se combiner à la molécule voisine de chlore, il se formera un groupement nouveau représenté par la figure 6. On peut se faire ainsi une idée de la façon dont le bain se comporte, et s'expliquer comment les molécules voisines des électrodes semblent seules avoir pris part à l'action. C'est une conséquence de la première loi de Faraday qui établit l'identité de l'action chimique en tous les points d'un même circuit.

18. Actions secondaires. — Les phénomènes d'électrolyse ne sont pas toujours aussi simples que l'indique la théorie précédente, et il se présente souvent des *actions secondaires* qui modifient complètement les résultats primitifs. Ainsi, si l'on opère sur une dissolution de chlorure de sodium ou de potassium, le métal qui se porte au pôle négatif décompose l'eau, il y a formation de soude, et l'on voit de l'hydrogène se dégager à ce pôle. Il arrive aussi que le chlore qui se produit au pôle positif se dissout en grande partie dans l'eau et peut attaquer l'anode si la nature du métal le permet.

Ces différentes actions qui se passent simultanément donnent souvent lieu à des phénomènes très complexes. Nous en verrons diverses applications dans la théorie de la pile et dans l'électrochimie industrielle.

ACTIONS CALORIFIQUES DES COURANTS

19. Loi de Joule. — Des expériences très simples montrent que le passage du courant électrique dans un conducteur échauffe ce dernier. Cet échauffement varie suivant les circonstances et peut même être assez fort, lorsqu'on emploie un fil métallique de très

faible diamètre, pour porter ce fil au rouge. C'est là le principe des lampes à incandescence employées dans l'éclairage électrique.

La loi de cette action calorifique a été donnée par Joule et vérifiée expérimentalement par M. Favre. Elle s'énonce de la manière suivante :

La quantité de chaleur dégagée dans l'unité de temps par le passage du courant dans un conducteur est proportionnelle à la résistance de ce conducteur et au carré de l'intensité.

Soient q cette quantité de chaleur, R la résistance, I l'intensité, et A un coefficient qui, comme l'a démontré l'expérience, n'est autre chose que l'équivalent mécanique de la chaleur, on a :

$$q = \frac{1}{A} R I^2.$$

La quantité q_1 de chaleur dégagée dans le temps t sera, par suite,

$$q_1 = qt = \frac{1}{A} R I^2 t$$

ou, d'après la loi de Ohm, en appelant E la différence de potentiel,

$$q_1 = \frac{1}{A} EIt.$$

Mais It est la quantité Q d'électricité qui a passé dans le temps t. La formule peut donc encore s'écrire

$$q_1 = \frac{1}{A} EQ.$$

Cette formule s'étend de la façon la plus simple au cas d'un circuit électrique lorsque le passage du courant ne donne lieu qu'à des actions calorifiques, et l'on peut dire que, dans ce cas, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la force électromotrice et à la quantité d'électricité qui traverse le circuit.

20. Travail calorifique produit par un courant. — D'après la théorie de l'équivalence du travail et de la chaleur, il est légitime d'assimiler à un travail la chaleur développée par le passage du courant.

Ce travail sera égal au produit de la quantité de la chaleur dégagée q_1 par l'équivalent mécanique A, soit Aq_1. Les formules

précédentes donnent donc, en désignant ce travail par T pour un temps t,

$$T = RI^2t,$$

ou

$$T = EQ.$$

Le travail transformé en chaleur est égal au produit de la résistance par le carré de l'intensité et par le temps, ou encore au produit de la force électromotrice par la quantité d'électricité.

Pendant l'unité de temps le travail est donné par :

$$T = RI^2$$

ou

$$T = EI.$$

MAGNÉTISME

Nous n'exposerons pas ici les expériences nombreuses qui ont été faites sur les aimants et qui ont servi à constituer la théorie du *Magnétisme*. Nous supposerons que nos lecteurs possèdent ces notions élémentaires et nous allons seulement rappeler les principales définitions et les lois du magnétisme.

21. Loi des attractions et répulsions magnétiques. — *Les pôles de deux aimants s'attirent quand ils sont de noms contraires, et ceux de même nom se repoussent.*

On appelle *masse magnétique* d'un pôle la force avec laquelle ce pôle agit, et l'unité de masse est celle qui, agissant sur une masse égale située à l'unité de distance, donne naissance à l'unité de force.

La force f *qui s'exerce entre deux masses magnétiques* m *et* m' *est proportionnelle au produit de ces deux masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance* r. On peut donc écrire

$$f = \frac{m\,m'}{r^2}.$$

22. Champ magnétique. Lignes de force. — La présence d'un aimant se fait sentir dans l'espace environnant jusqu'à une certaine dis-

tance et y donne naissance à des forces spéciales d'attractio.. ' répulsion. L'étendue dans laquelle cette influence s'exerce a nommée *champ magnétique* et, pour simplifier le langage, rapporte souvent à ce champ les effets qui doivent être attribué: l'aimant lui-même. La direction et l'intensité de ces forces varie en chaque point du champ. Faraday a eu l'idée de représenter (actions par des courbes nommées *lignes de force* qui donnent s la surface du champ les différentes directions de l'action magr tique. L'intensité de cette action, ou, suivant l'expression adopt(l'*intensité du champ magnétique*, dépend nécessairement de la d tance du point considéré à l'aimant. L'étude d'un champ magn tique comporte donc en chacun de ses points la direction de ligne de force qui y passe et l'intensité du champ.

Pour mesurer l'intensité H du champ magnétique en un poi donné, on suppose que l'on place en ce point un aimant de mas magnétique m. Par définition, l'intensité H est proportionnelle la force f qui agit alors sur cet aimant.

D'un autre côté, cette force f est aussi proportionnelle à la mas: magnétique m de l'aimant; on peut donc écrire

$$f = m\,\mathrm{H}.$$

La direction d'une ligne de force en un point du cham magnétique est celle suivant laquelle un pôle magnétique libr placé en ce point tend à être entraîné ; en d'autres termes, c'e: la direction de l'action magnétique qui est réellement produite pa l'aimant au point considéré.

Plaçons une petite aiguille aimantée ns dans un champ magné tique produit par l'aimant NS (fig. 7) ; le pôle s de nom contrair à N est sollicité par une force f_1, et le pôle n par une force f_2 diri gée en sens inverse. Sous l'action de ces deux forces, l'aiguill(tournera sur elle-même et prendra la direction de la tangente a point A à la ligne de force.

Le signe attribué au sens de ces lignes de force a été décid(d'une façon arbitraire : on est convenu de regarder comme posi- tives celles qui sont dirigées d'un pôle nord vers un pôle sud, e comme négatives celles qui sont dirigées en un sens inverse. Le sens du mouvement d'un pôle nord libre de se déplacer dans le

[illegible] magnétique indique, par conséquent, le sens des lignes de force.

Les lignes de force peuvent aussi donner la valeur de l'intensité du champ. On admet en effet que ces lignes existent en quantité proportionnelle à l'intensité, c'est-à-dire que l'existence d'une ligne de force correspond à une valeur déterminée de cette intensité. Il est alors facile de concevoir que l'action exercée sur un aimant placé dans le champ magnétique sera d'autant plus énergique que cet aimant coupera un plus grand nombre de lignes de force. On pourra donc représenter l'action magnétique exercée sur une surface donnée par le nombre de lignes de force qui couperont cette surface.

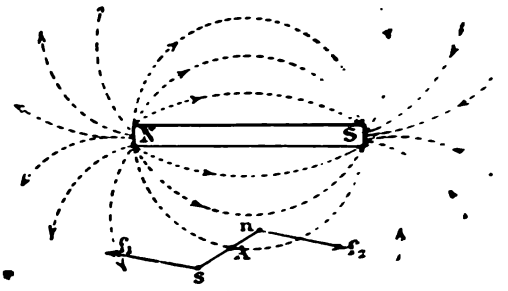


Fig. 7.

Ces lignes de force ne sont pas d'ailleurs purement hypothétiques; elles ont une existence réelle, comme on peut le voir au moyen des *fantômes magnétiques* imaginés par Faraday. L'expérience se fait en laissant tomber de la limaille de fer sur un papier qui recouvre un barreau aimanté. Les grains de limaille se distribuent suivant des courbes régulières qui ne sont autre chose que les lignes de force. On peut encore promener dans un champ magnétique une aiguille aimantée mobile autour de son centre, comme nous l'avons déjà dit, cette aiguille [illegible] tangente à la ligne de force qui passe par son centre.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

[illegible] courant sur un aimant. Loi d'Ampère [illegible]

qu'exerce un conducteur fixe traversé par un courant sur une aiguille aimantée mobile fut observée en 1820 par Œrsted. Mais ce fut Ampère qui trouva la loi à laquelle ce phénomène est soumis ; il en donna l'énoncé suivant :

Un courant agissant sur une aiguille aimantée tend toujours à la placer dans une direction perpendiculaire à la sienne, de manière que le pôle nord de l'aiguille soit à la gauche du courant.

La gauche du courant est définie en supposant un observateur placé suivant la direction même du courant et ayant la face tournée vers l'aiguille, de telle sorte que ses pieds soient du côté du pôle positif et sa tête du côté du pôle négatif, ou encore, suivant l'expression admise, de telle sorte que le courant entre par ses pieds et sorte par sa tête.

24. Action d'un aimant sur un courant. — L'action d'un courant sur un aimant, dont nous venons de parler, est réciproque, c'est-à-dire que, si l'on approche un aimant d'un circuit mobile traversé par un courant, celui-ci se déplace à son tour et tend à prendre une position perpendiculaire à celle de l'aimant.

25. Lois d'Ampère. — Ces différentes actions sont réglées par les lois suivantes formulées par Ampère :

Lorsqu'un courant et un aimant sont en présence l'un de l'autre, l'action exercée entre un des pôles de cet aimant et une portion infiniment petite du conducteur a une direction perpendiculaire au plan qui passe par le pôle et l'élément du courant.

Cette action varie en raison inverse du carré de la distance du pôle à l'élément. Elle est proportionnelle à l'intensité du courant, à la quantité de magnétisme du pôle et au sinus de l'angle que fait la direction de l'élément avec la droite qui le joint au pôle.

Soit f la force exercée par un élément ds de courant, ayant une intensité i, sur un pôle magnétique d'intensité m située à la distance r. Soit α l'angle que fait la direction de l'élément avec la droite qui joint le pôle à l'élément, on peut poser

$$f = \frac{m\,i\,ds}{r^2} \sin \alpha.$$

Si la droite qui joint le pôle à l'élément est perpendiculaire à la direction de l'élément, $\sin \alpha = 1$ et l'on a

$$f = \frac{m\,i\,ds}{r^2}.$$

Cette formule exprime la force exercée par un élément de courant circulaire enroulé autour d'un pôle magnétique placé au centre même du cercle. Elle est utile pour la détermination des unités électriques que nous développerons à la fin du volume.

L'action des courants sur les aimants a été appliquée, comme nous le verrons, dans la construction des galvanomètres, qui servent à indiquer l'existence des courants et à opérer les différentes mesures qu'ils comportent.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

26. Actions des courants sur les courants. Lois d'Ampère. — Les résultats, obtenus par Ampère dans ses recherches sur les actions mutuelles des courants et des aimants, lui firent soupçonner une certaine relation entre l'électricité et le magnétisme, et l'amenèrent naturellement à supposer que deux courants pouvaient exercer l'un sur l'autre des actions mécaniques.

Le cadre de notre ouvrage ne nous permet pas de décrire toutes les expériences faites par Ampère à ce sujet ; nous allons simplement en rappeler les conclusions, qui sont formulées par les lois suivantes :

1° *Deux courants parallèles et de même sens s'attirent.*

2° *Deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.*

3° *Deux courants angulaires s'attirent s'ils s'approchent ou s'éloignent tous les deux à la fois de leur point de croisement, ou plus généralement du pied de leur perpendiculaire commune (pour le cas où ils ne sont pas dans le même plan). Ils se repoussent si l'un approche de ce point, tandis que l'autre s'en éloigne.*

4° *L'action qui s'exerce entre deux courants est dans tous les cas proportionnelle au produit des intensités de ces courants par leurs*

longueurs ; elle varie en raison inverse du carré de leur distance.

5° *Deux éléments consécutifs d'un même courant se repoussent.*

6° *Un courant sinueux produit la même action qu'un courant rectiligne qui s'en écarte infiniment peu et qui est terminé aux mêmes extrémités.*

27. Solénoïdes. — On appelle *solénoïdes* un système de courants circulaires égaux, de même sens, et dont les centres sont sur une même droite à laquelle les plans des cercles sont perpendiculaires ; cette droite constitue l'axe du solénoïde.

Dans la pratique, on construit un solénoïde en enroulant un fil en hélice et en ramenant le conducteur parallèlement à l'axe (fig. 8). Une portion de ce fil peut être en effet décomposée en deux éléments, dont l'un a une direction rectiligne parallèle à l'axe, tandis que l'autre est circulaire et placé dans un plan perpendiculaire à l'axe, ces deux éléments étant respectivement égaux aux projections de la portion d'hélice. D'après la loi des courants sinueux énoncée ci-dessus, chaque portion du fil produit le même effet que ces deux éléments. Or, l'action des éléments rectilignes est détruite par celle du fil de retour, et l'on n'a à considérer en définitive que l'effet des éléments circulaires qui, d'après la définition, constituent le solénoïde.

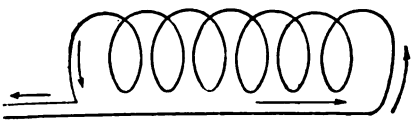


Fig. 8.

Un solénoïde se dirigeant comme un aimant sous l'action de la terre, on est conduit à lui donner deux pôles situés à ses deux extrémités ; le pôle austral sera à la gauche de l'observateur supposé placé le long de l'hélice et regardant l'axe, de telle façon que le courant marche de ses pieds vers sa tête.

28. Théorie du magnétisme d'Ampère. — Les solénoïdes jouissent de toutes les propriétés des aimants; cette identité d'action a été démontrée par un grand nombre d'expériences. Ampère en a déduit une théorie ingénieuse, d'après laquelle un aimant est un assemblage de solénoïdes particulaires semblablement orientés et se comporte comme un véritable solénoïde.

L'aimantation consiste alors dans l'orientation des courants particulaires qui, dans les substances magnétiques à l'état neutre, sont dirigés au hasard et se neutralisent mutuellement; ces courants particulaires une fois orientés constituent une série de solénoïdes particulaires, parallèles et de même sens. Le barreau aimanté n'est donc pas autre chose qu'un solénoïde.

29. Aimantation par les courants. — L'action d'un courant sur un aimant ou sur un solénoïde une fois connue, on s'est naturellement demandé si un courant ne pouvait pas agir sur un corps magnétique non aimanté.

Ampère fit cette expérience en plaçant en croix avec un courant une aiguille d'acier; il obtint ainsi l'aimantation de l'aiguille. Il observa ensuite une action plus rapide et plus énergique en plaçant l'aiguille d'acier suivant l'axe d'une hélice formée par le conducteur.

Comme les aimants, les courants électriques sont en effet entourés d'un champ magnétique, dont les lignes de force peuvent être démontrées de la même manière. Pour les observer, on passe un fil traversé par un courant dans un trou percé à travers une carte ou un morceau de verre, et l'on verse de la limaille de fer sur cette carte. La limaille se dispose suivant des circonférences concentriques très distinctes, ce qui montre que des lignes de force entourent complètement le fil et que celui-ci est environné d'une sorte de tourbillon magnétique.

30. Électro aimants. — Supposons qu'on remplace l'aiguille d'acier de l'expérience précédente par un barreau de fer doux, le courant qui parcourt l'hélice a pour effet d'aimanter le fer doux. Mais l'aimantation disparaît dès que le courant est interrompu; l'action est absolument instantanée.

C'est sur ce principe que sont basés les appareils nommés *électro-aimants*. On les construit, dans la pratique, en enroulant sur un barreau de fer doux un fil de cuivre recouvert de soie.

Le passage du courant dans ce fil donne des propriétés magnétiques au fer doux et y détermine deux pôles de noms contraires. La règle suivante, donnée par Ampère, permet de déterminer leurs signes.

Lorsqu'un courant traverse le fil d'un électro-aimant et qu'on regarde un pôle de ce dernier, le pôle sud est celui pour lequel le courant circule dans le sens des aiguilles d'une montre, et le pôle nord celui pour lequel le courant circule en sens inverse.

Les électro-aimants peuvent développer temporairement une force magnétique beaucoup plus considérable que celle des aimants permanents les plus énergiques. Ils ont de plus cet immense avantage de n'agir qu'au moment voulu et seulement pendant la période de temps nécessaire. Aussi ont-ils donné lieu à de nombreuses et remarquables applications dans toutes les branches de l'électricité. Les appareils télégraphiques, les lampes régulateurs, les machines dynamo-électriques sont presque tous basés sur leur emploi.

La pièce sur laquelle agit l'électro-aimant est appelée *armature*.

Magnétisme rémanent. — Théoriquement l'aimantation d'un électro-aimant doit disparaître aussitôt que le courant est interrompu. En réalité il n'en est pas toujours ainsi et, lorsqu'il y a eu contact entre les pôles et l'armature, on constate souvent que celle-ci ne se détache pas immédiatement après l'ouverture du circuit.

Cet effet est dû à la présence dans le fer doux d'une certaine quantité de magnétisme appelé *rémanent*, qui peut avoir de graves inconvénients dans la pratique. Ce magnétisme rémanent est d'ailleurs d'autant plus faible que le fer est plus pur.

La cause inconnue du magnétisme rémanent a reçu le nom de *force coercitive*.

Construction des électro-aimants. — La première condition pour constituer un électro-aimant est de prendre du fer doux qui n'ait aucune force coercitive. Pour cela on choisit du fer aussi pur que possible ; le fer au bois est indispensable et ceux du Berri sont généralement employés. Puis après avoir donné aux barreaux la forme qu'ils doivent prendre, on les recuit à plusieurs reprises et on achève de les travailler non pas au marteau, mais à la lime. On évite ainsi la production de la force coercitive que l'écrouissage communique même au fer le plus pur.

La forme d'un électro-aimant dépend essentiellement de l'application à laquelle il est destiné. Celle que nous venons d'indiquer plus haut, consistant en un barreau de fer entouré d'une bobine, est désignée sous le nom d'électro *droit*.

On construit souvent l'électro-aimant en courbant le barreau en forme de fer à cheval, et l'on place les deux branches ainsi obtenues dans deux bobines A, B (fig. 9) sur lesquelles s'enroule un

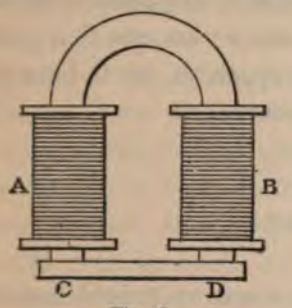


Fig. 9.

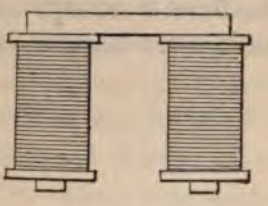


Fig. 10.

même fil de cuivre. Il faut seulement avoir soin de régler le sens de cet enroulement de façon que les actions des deux bobines soient concordantes; pour arriver à ce résultat, l'enroulement doit être tel qu'en supposant le barreau redressé et les bobines superposées par leurs faces supérieures, l'hélice de l'une soit la continuation de l'hélice de l'autre.

La disposition en fer à cheval présente l'avantage que les deux pôles de l'électro-aimant agissent simultanément sur l'armature et que, par suite, l'action résultante est plus considérable.

Au lieu de courber un barreau en fer à cheval, ce qui peut donner naissance à une force coercitive, on préfère souvent réunir par une traverse de fer doux deux barreaux placés parallèlement (fig. 10). La construction de l'appareil se trouve ainsi simplifiée.

Enfin on emploie quelquefois une modification de cette dernière forme, qui consiste à ne mettre de bobine que sur une seule branche de l'électro-aimant. Dans ce cas, l'appareil est dit *boiteux*.

Dans un électro-aimant, chaque spire de fil exerce une action sur le noyau. On serait donc tenté de penser qu'il y a intérêt à prendre le plus grand nombre possible de ces spires pour accroître

l'intensité magnétique du fer doux. Mais, en agissant ainsi, on augmente la longueur du conducteur ; de plus, on est obligé d'employer un fil plus fin, pour ne pas avoir une bobine trop volumineuse. Pour cette double raison, on accroît la résistance du fil, c'est-à-dire qu'on diminue l'intensité du courant et, par suite, l'intensité magnétique du noyau. Il y a donc une limite pour le nombre de spires. Cette limite dépend d'ailleurs du rôle que l'électro-aimant est appelé à remplir, et il est difficile de donner des règles générales s'appliquant à tous les cas que l'on peut rencontrer. Dans la construction de ces appareils, on se base surtout sur les données fournies par l'expérience.

INDUCTION

31. Courants d'induction. — Nous avons vu précédemment que l'acier et le fer doux pouvaient acquérir des propriétés magnétiques sous l'influence des courants électriques. Faraday pensa que la réciproque de ce principe devait être vraie, c'est-à-dire qu'un aimant pouvait donner naissance à des courants. Puis, s'appuyant sur la théorie d'Ampère, il fut conduit à supposer que, puisque les aimants n'étaient eux-mêmes que des systèmes de courants, les courants ordinaires devaient eux aussi produire d'autres courants. C'est ce qu'il démontra expérimentalement en 1831.

Ces courants développés soit par un aimant, soit par un autre courant, ont reçu le nom de *courants induits* ou *d'induction*. L'aimant ou le courant qui leur donne naissance s'appelle l'*inducteur*.

Le circuit parcouru par le courant inducteur est dit circuit *primaire ;* celui qui est traversé par le courant induit est dit circuit *secondaire*.

Enfin le courant induit est *direct* s'il a le même sens que le courant inducteur, et *inverse* s'il a un sens contraire.

Les courants induits prennent naissance dans deux cas différents :

1° Lorsqu'on approche ou qu'on éloigne d'un circuit un aimant ou un conducteur traversé par un courant;

2° Lorsqu'on fait varier l'intensité d'un courant dans un conducteur voisin ; ce cas renferme ceux de la fermeture et de l'ouverture de ce circuit.

Les courants induits sont inverses pour l'approche du courant ou de l'aimant inducteur et pour tout accroissement de l'intensité du courant inducteur.

Ils sont directs pour l'éloignement de l'inducteur et pour toute diminution de cette intensité.

L'hypothèse du champ magnétique permet d'énoncer d'une autre manière ces différents phénomènes. Lorsqu'on fait varier la distance qui sépare un conducteur d'un courant ou d'un aimant, on augmente ou l'on diminue le nombre des lignes de force magnétiques qui rencontrent ce conducteur. Lorsqu'on modifie l'intensité d'un courant, on change le champ magnétique qui l'entoure, c'est-à-dire le nombre des lignes de force de ce champ, et, par suite, le nombre de ces lignes qui coupent le conducteur induit.

On peut donc dire d'une façon générale que, toutes les fois qu'on fait varier le nombre des lignes de force que rencontre un conducteur placé dans un champ magnétique, ce conducteur se trouve parcouru par un courant induit.

Ce courant induit est inverse si le nombre de lignes de force augmente ; direct s'il diminue.

32. Loi de Lenz. — Il est utile de remarquer que ces courants inducteurs et induits agissent les uns sur les autres conformément aux lois d'Ampère (§ 26). Ainsi, lorsqu'on approche un courant d'un conducteur fermé, on détermine un courant inverse ou de sens contraire au courant inducteur ; il se produit, par suite, entre ces deux courants une force répulsive qui s'oppose au mouvement. De même, lorsqu'on éloigne l'inducteur, on développe dans l'induit un courant direct ou de même sens qui tend à attirer l'inducteur et s'oppose encore au mouvement. Cette propriété constitue la loi de Lenz.

Quand on déplace un circuit devant un courant ou un aimant, ou réciproquement, le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose au mouvement qui le produit.

La durée des courants induits est égale à celle du mouvement relatif ou du changement d'intensité qui leur donne naissance. Elle est donc infiniment petite.

La quantité d'électricité qu'ils mettent en jeu est au contraire très grande, même dans des circuits très résistants. C'est grâce à cette propriété que les applications des courants induits ont pris une extension considérable et qu'ils ont pu être utilisés dans les bobines d'induction, les appareils téléphoniques et les machines électriques.

33. Courants induits d'ordres supérieurs. — De même que les courants ordinaires produisent des courants induits, ceux-ci peuvent à leur tour exercer une action inductrice sur les conducteurs voisins, et ainsi de suite.

Ces différents courants sont dits de premier, de second, de troisième ordre, etc., suivant qu'ils sont dus à une, à deux, à trois inductions...

Le courant induit du second ordre, étant développé par un courant qui commence et finit à deux époques très voisines l'une de l'autre, est composé de deux courants successifs égaux et contraires, dont la durée respective est encore plus faible que celle des courants induits de premier ordre. Les courants d'ordres supérieurs ont une constitution analogue, mais plus compliquée ; ils n'ont d'ailleurs reçu jusqu'à présent aucune application.

34. Extra-courants. — Les réactions qui ont lieu entre deux éléments voisins de deux circuits différents peuvent s'exercer d'une manière analogue entre deux éléments consécutifs d'un même circuit, lorsque l'intensité du courant varie. Cette action constitue l'*extra-courant* ou la *self-induction*, suivant une expression anglaise introduite dans notre langue. Elle est surtout sensible lorsqu'une partie du conducteur est enroulée plusieurs fois sur elle-même, de manière que chacun de ses éléments ait dans son voisinage un grand nombre d'autres éléments. Ses résultats sont en général nuisibles, comme nous le verrons dans l'étude des machines électriques.

L'extra-courant se produisant lorsque l'intensité du courant varie,

on est naturellement conduit à distinguer deux cas, celui où cette intensité augmente et celui où elle diminue.

Dans le premier, qui comprend comme cas particulier la fermeture du circuit, l'extra-courant est un courant inverse qui diminue pour un moment l'intensité du courant principal. Il retarde l'établissement du régime.

Dans le second cas, qui renferme l'ouverture du circuit, l'extra-courant agit au contraire dans le même sens que le courant principal dont il augmente l'intensité. Son résultat est de prolonger un instant l'effet de ce dernier.

35. Lois des courants induits. — Il faut remarquer que, contrairement à ce qui se passe pour les courants ordinaires, l'intensité d'un courant induit varie avec le temps, infiniment petit d'ailleurs, pendant lequel il dure. Elle part de zéro, atteint un maximum et redevient nulle.

On ne peut donc pas parler de l'intensité d'un courant induit, mais bien de la quantité d'électricité qu'il met en jeu, ou encore de son *intensité moyenne*. Ce dernier élément s'obtient en divisant la quantité d'électricité par le temps.

Les courants induits sont soumis aux lois générales suivantes :

1° *La quantité d'électricité développée dans le circuit induit est proportionnelle à l'intensité du courant (ou de l'aimant) inducteur.*

2° *Les quantités d'électricité du courant induit inverse et du courant induit direct, produites par la fermeture et la rupture d'un même circuit ou par l'approche et l'éloignement d'un même inducteur, sont égales et de signes contraires.*

3° *Pour une même variation du courant inducteur, ou pour un même déplacement de l'inducteur, la quantité d'électricité induite est indépendante du temps pendant lequel l'induction a lieu.*

4° *La quantité d'électricité induite ne dépend pas du chemin parcouru par l'inducteur, lorsqu'on opère par approche ou par éloignement, mais seulement de ses positions extrêmes.*

36. — L'intensité moyenne étant égale au quotient de la quantité d'électricité par le temps, on a encore les lois suivantes :

1° *L'intensité moyenne est inversement proportionnelle au temps pendant lequel l'induction a lieu.*

2° *Les courants induits par approche ou par éloignement ont une intensité moyenne proportionnelle à la vitesse du déplacement.*

3° *Les courants induits par les variations d'intensité du courant inducteur ont à chaque instant une intensité proportionnelle à la dérivée de l'intensité du courant inducteur par rapport au temps.*

37. — On a vu que la propagation électrique entre deux points d'un conducteur avait lieu en vertu de la différence de potentiel de ces points. Les courants induits, étant un mouvement d'électricité comme les courants ordinaires, doivent être produits par une différence de potentiel. Cette différence de potentiel sera pour nous la force électromotrice du courant induit.

Il y a lieu de rechercher les forces électromotrices induites. On les obtient par l'application de la loi de Ohm, en ayant soin de remplacer dans la formule ordinaire l'intensité par l'intensité moyenne,

Soient E cette force électromotice, Q la quantité d'électricité développée, R la résistance du circuit, θ le temps, on a

$$E = \frac{QR}{\theta}.$$

On peut tirer de cette formule quelques conclusions qui indiquent les meilleures conditions à réaliser pour avoir un courant induit énergique.

On voit en effet que la force électromotrice est proportionnelle à la quantité d'électricité mise en jeu. Comme cette quantité est elle-même proportionnelle à l'intensité du courant (ou de l'aimant) inducteur, il résulte de là que cette intensité devra être élevée.

La force électromotrice est proportionnelle à la résistance du circuit induit. On aura donc intérêt à prendre un fil induit de grande résistance, c'est-à-dire un fil très long et très fin.

Mais en augmentant la longueur du fil induit, on accroît les dimensions de la bobine et, par suite, la longueur du fil inducteur; comme la résistance de celui-ci doit être faible, il faudra lui donner un gros diamètre.

Enfin la force électromotrice varie en raison inverse du temps. Donc, plus la vitesse du mouvement relatif de l'induit et de l'inducteur sera grande, plus le courant produit sera énergique.

38. Courants alternatifs et courants continus. — Imaginons que nous opérions par rapport à un inducteur deux déplacements inverses et égaux d'un conducteur induit ; les quantités d'électricité développées dans les deux cas seront égales, mais les courants induits auront des sens opposés. Si donc, par un artifice mécanique, on parvient à produire une série de déplacements relatifs de l'induit et de l'inducteur inverses et égaux, se succédant à des intervalles infiniment rapprochés, on obtient une série de courants induits égaux et de signes contraires, qui se suivront eux aussi presque sans interruption. C'est ce qu'on appelle des *courants alternatifs*.

Il est aussi facile de concevoir que, si l'on emploie un commutateur convenable, on peut amener tous ces courants à avoir le même sens dans la partie du conducteur qui n'est pas soumise à l'induction. On obtient ainsi un courant à peu près uniforme auquel on a donné le nom de *courant continu*.

Telles sont les conclusions générales que nous pouvons établir dès maintenant et sur lesquelles reposent les principes des machines électriques actuelles.

CHAPITRE II

UNITÉS

La question des unités électriques est une de celles qui semblent à première vue présenter le plus de complications dans l'étude de l'électricité. C'est que ces unités dépendent d'un système d'unification récemment établi, qui embrasse tous les phénomènes physiques, et qu'il est difficile de les définir complètement sans parler des autres unités et sans expliquer les relations qui les rattachent entre elles. Mais ces considérations purement abstraites n'ont pas dans la pratique une très grande importance ; elles n'ont pour but que de fixer d'une manière précise les dimensions des étalons.

Nous les passerons donc sous silence ; car le praticien n'a qu'à adopter les unités telles qu'elles sont définies, sans se préoccuper de ce qu'elles représentent, de même que celui qui mesure une longueur n'a pas besoin de se rapporter au méridien terrestre quand il fait usage du mètre.

Ceux de nos lecteurs qui voudront approfondir la question trouveront à la fin de ce volume une note donnant la théorie complète du système d'unités actuellement adoptées.

39. Système CGS d'unités absolues. — Les unités électriques employées maintenant d'une façon générale font partie d'un système dit d'*unités absolues*, qui se compose d'unités *fondamentales* arbitrairement choisies et d'unités *dérivées* dépendant des premières. Proposé par l'Association britannique, ce système a été adopté

avec quelques modifications par le Congrès international des Electriciens en 1881.

Les unités fondamentales sont au nombre de trois : la *longueur*, la *masse* et le *temps*.

L'unité de longueur est le *centimètre*.

L'unité de masse est le *gramme*, masse d'un corps pesant un gramme à Paris.

L'unité de temps est la *seconde*.

Le système qui en a été déduit a, par suite, reçu le nom de *système centimètre-gramme-seconde*, ou, d'une manière abrégée, *système CGS*.

40. Unités électriques pratiques. — Les unités dérivées du système CGS sont tantôt trop grandes, tantôt trop petites pour qu'on puisse en faire usage dans la pratique. Aussi a-t-on fait choix d'*unités pratiques* convenables, dont les rapports aux unités CGS correspondantes sont toujours des multiples ou des sous-multiples de 10. Leur emploi simplifie les calculs sans que l'ensemble du système ait à en souffrir et elles sont maintenant adoptées d'une façon exclusive.

La valeur de ces unités pratiques a été déterminée, le 3 mai 1884, par la Conférence internationale réunie à Paris à cet effet. Nous allons les passer en revue.

Ohm. — L'unité pratique de résistance est l'*ohm*.

L'ohm est représenté par une colonne de mercure de 1 millimètre carré de section et de 106 centimètres de longueur à la température de la glace fondante.

C'est à peu près la résistance d'un fil de cuivre pur de 1 millimètre de diamètre et de 48 mètres de longueur, ou encore celle d'un fil de fer de 4 millimètres de diamètre et de 100 mètres de longueur.

Ampère. — L'unité pratique d'intensité est l'*ampère*.

Dans l'industrie, sa valeur est généralement représentée par la quantité d'argent qu'il dépose par seconde. D'après les récents calculs de M. Kohlrausch, cette quantité est de 1,11888 milligramme.

Volt. — L'unité pratique de force électromotrice est le *volt*.

C'est la force électromotrice qui produit un courant de 1 ampère dans une résistance de 1 ohm. Le volt est à peu près égal a la force électromotrice d'un élément Daniell ordinaire.

Coulomb. — L'unité pratique de quantité est le *coulomb*.

C'est la quantité d'électricité qui traverse un conducteur pendant 1 seconde lorsque l'intensité est de 1 ampère.

Il résulte de là que les expressions *ampère* et *coulomb par seconde* ont une signification identique. Il revient au même de dire qu'un courant a tant d'ampères ou tant de coulombs par seconde.

On emploie beaucoup dans les mesures industrielles le terme *ampère-heure*. L'ampère-heure est la quantité d'électricité qui traverse un conducteur pendant une heure lorsque l'intensité du courant est de 1 ampère.

Le coulomb représentant par définition la quantité d'électricité qui passe dans ces conditions pendant 1 seconde, il en résulte qu'un ampère-heure vaut 3 600 coulombs.

Farad. — L'unité pratique de capacité est le *farad*.

C'est la capacité qui renferme 1 coulomb d'électricité avec une force électromotrice de 1 volt.

Remarquons que les unités de force électromotrice, de quantité et de capacité, se déduisent des deux autres au moyen des relations connues (§§ 3, 5, 13) ;

$$E = IR$$
$$Q = It$$
$$C = \frac{Q}{E}.$$

I étant l'intensité, E la force électromotrice, R la résistance, Q la quantité, t le temps et C la capacité.

41. — Lorsque ces unités pratiques sont trop grandes ou trop petites par rapport aux quantités mesurées, on les fait précéder

de préfixes qui désignent des multiples ou des sous-multiples. Ainsi

méga	signifie	1 000 000 de fois l'unité.
myria	—	10 000 de fois l'unité.
milli	—	$\frac{1}{1\,000}$ de fois l'unité.
micro	—	$\frac{1}{1\,000\,000}$ de fois l'unité.

Les grandes résistances s'expriment alors en *megohms*, les petites résistances en *microhms*, les faibles intensités en *milliampères*, les grandes quantités en *myriacoulombs*, les faibles capacités en *microfarads*, etc.

42. Volt-coulomb et watt. — Nous avons vu (§ 20) que, d'après la loi de Joule et la théorie de l'équivalence du travail et de la chaleur, le travail transformé en chaleur par le passage du courant est égal au produit de la différence de potentiel par la quantité d'électricité $E \times Q$. Ce produit a reçu le nom de *volt-coulomb* ou de *Joule*.

L'unité de volt-coulomb correspond par suite au travail de 1 coulomb pour une différence de potentiel de 1 volt.

Nous avons vu aussi que pendant l'unité de temps ce travail est égal à $E \times I$, c'est-à-dire au produit de la différence de potentiel par l'intensité. Ce produit, qui a été appelé *volt-ampère* ou *Watt*, représente la puissance du courant.

L'unité de Watt est la puissance d'un courant dont l'intensité est de 1 ampère pour une différence de potentiel de 1 volt.

Il existe d'ailleurs entre le volt-coulomb, ou l'énergie, et le watt, ou la puissance, une relation identique à celle qui relie la quantité et l'intensité, et l'on a :

$$\text{Volt-coulomb} = \text{Watt} \times \text{Temps}.$$

L'unité de Watt, c'est l'unité de volt-coulomb pendant 1 seconde.

43. — Considérons maintenant le cas plus général où le circuit trique comprend une série d'appareils a, a', a'' (fig. 11), dans

lesquels le courant se transforme en énergie, soit calorifique, soit chimique, soit mécanique. Nous obtenons une intensité I et une force électromotrice E qui, comme nous le verrons plus loin dans l'étude de la pile, correspond à la quantité de zinc dissoute par la pile P.

Supprimons les appareils *a*, *a'*, *a''*, et remplaçons-les par un conducteur métallique BCD dont nous ferons varier la longueur jusqu'à ce que l'intensité du courant soit redevenue la même. D'après

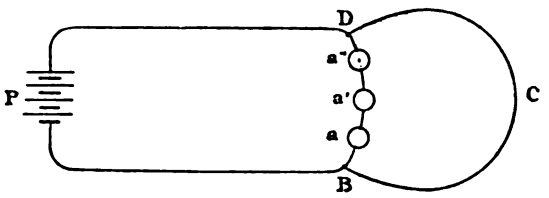


Fig. 11.

la loi de Faraday (§ 16), la quantité de zinc dissoute dans la pile ne changera pas, ni la force électromotrice. Les quantités d'énergie consommées dans les deux circuits PB *a a' a''* D et PBCD sont donc égales, et nous pouvons prendre pour mesure de la première la valeur de la seconde, c'est-à-dire la quantité EI si nous considérons l'unité de temps.

De plus, si nous appelons *e* la différence de potentiel des points B, D, nous savons que, dans le conducteur BCD, le travail produit par seconde sous forme de chaleur est *e*I. Si nous remplaçons ce conducteur par la série d'appareils *a*, *a'*, *a''*, rien n'est changé dans le reste du circuit; le travail absorbé par seconde entre les deux points B, D restera donc le même et pourra se représenter par *e*I. Nous sommes donc amenés à énoncer la règle suivante :

L'énergie électrique absorbée pendant une seconde entre deux points qui font partie d'un circuit, et transformée soit en chaleur, soit en énergie chimique ou mécanique, peut se représenter en watts par le produit de l'intensité par la différence de potentiel de ces deux points.

Si, au lieu d'une seconde, on considère un temps *t*, l'énergie absorbée s'obtient en volts-coulombs en multipliant ce produit par

t, ou encore en prenant le produit de la différence de potentiel par la quantité d'électricité qui a traversé le conducteur.

44. Unité de travail. — L'unité pratique de travail est le *kilogrammètre*, ou le travail produit par 1 kilogramme tombant d'une hauteur de 1 mètre.

D'un autre côté, nous venons de voir que l'énergie électrique se calcule en multipliant la force électromotrice par la quantité d'électricité. Il faut donc trouver une relation qui permette de traduire en kilogrammètres la valeur obtenue en volt-coulombs. Cette relation est donnée par la règle suivante, dont on trouvera la démonstration à la fin du volume.

Le travail du courant électrique exprimé en kilogrammètres s'obtient en multipliant la différence de potentiel par la quantité d'électricité et en divisant le produit par l'accélération de la pesanteur.

Si l'on cherche le travail du courant pendant 1 seconde, ou, en d'autres termes, la puissance du courant, on multipliera la différence de potentiel par l'intensité et l'on divisera le produit par l'accélération de la pesanteur. Soit $\frac{EI}{g}$.

45. Cheval-vapeur. — Le *cheval-vapeur* est l'unité adoptée pour la puissance des machines. Il vaut 75 kilogrammètres par seconde.

On désigne sous le nom de *cheval-heure* le nombre de kilogrammètres fournis par un travail de 1 cheval pendant une heure (3 600 secondes). Le cheval-heure vaut donc $75 \times 3\,600$ ou 27 0000 kilogrammètres.

46. Calorie. Équivalent mécanique de la chaleur. — Nous ne faisons que rappeler ces définitions.

La *calorie* est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré centigrade la température de 1 kilogramme d'eau.

L'*équivalent mécanique* de la chaleur, c'est-à-dire la quantité de travail qu'il faut dépenser pour produire 1 calorie, est 424. En d'autres termes, la production de 1 calorie exige une dépense de 424 kilogrammètres; réciproquement, la dépense de 1 calorie développe un travail de 424 kilogrammètres.

Si donc on veut connaître la quantité de chaleur produite par un

courant, il suffit de diviser par 424 le nombre de kilogrammètres qui exprime le travail produit par ce courant. La quantité de calories est donnée par :

$$C = \frac{EI}{g \times 424} \text{ ou } C = \frac{RI^2}{g \times 424}.$$

Exemple. — Combien un courant de 20 ampères produit-il de calories en circulant pendant 1 heure dans un circuit ayant une résistance de 3 ohms ?

On a par seconde :

$$\frac{3 \times \overline{20}^2}{9{,}81 \times 424} = 0^{\text{cal.}},28.$$

Soit pendant une heure $0{,}28 \times 3\,600 = 1\,008$ calories.

47. Unités photométriques. — La mesure de l'intensité lumineuse s'exprime ordinairement en fonction de la lampe Carcel. Cette lampe, dont l'emploi a été recommandé par le Congrès international des Electriciens de 1881, brûle à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée et a les dimensions suivantes, qui ont été proposées par MM. Dumas et Regnault :

Diamètre extérieur du bec.	23,5	millimètres.
— du courant d'air intérieur.	17	—
— — extérieur.	45,5	—
Hauteur totale du verre	290	—
Distance du coude à la base du verre	61	—
Diamètre extérieur du niveau du coude. . .	47	—
— extérieur du verre pris au haut de la cheminée	34	—
Épaisseur moyenne du verre.	2	—

La consommation d'huile d'une lampe se détermine en observant le temps nécessaire à la combustion de 10 grammes. On en déduit la consommation correspondante pour une heure et la valeur éclairante de la lampe comparativement à celle de la carcel normale brûlant 42 grammes par heure.

On emploie souvent comme unité la *bougie ;* cette quantité n'est pas absolument définie ; elle varie avec les pays.

Il résulte des études faites par M. Monnier sur la valeur comparative des différentes bougies que la carcel normale vaut :

8,3 bougies anglaises de spermaceti.
7,5 bougies allemandes de paraffine.
6,5 bougies stéariques de Munich.
7,4 bougies stéariques de l'Étoile, de 5 au paquet.
7,6 bougies stéariques de l'Étoile, de 6 au paquet.

Quant à l'intensité lumineuse donnée par la combustion du gaz, elle n'a pu encore être déterminée d'une façon tout à fait précise ; elle varie du reste beaucoup suivant les usines et suivant la nature des charbons employés. On admet généralement que la lampe Carcel équivaut, à Paris, à un bec ordinaire consommant de 125 à 140 litres de gaz à l'heure.

48. — Ces divers étalons présentent des inconvénients inhérents à leur structure même. La texture de la mèche, les variations de composition de la matière grasse peuvent donner lieu à des différences notables dans des expériences identiques. La lampe Carcel possède, il est vrai, une plus grande constance que les bougies, mais avec cette condition, difficile à remplir dans la pratique, qu'on ne néglige aucune des nombreuses précautions formulées par MM. Dumas et Regnault.

On a donc cherché comme étalon une autre source lumineuse, produite par un phénomène physique parfaitement défini et constant et qui, par suite, reste toujours semblable à elle-même. Le platine à son point de fusion, proposé par M. J. Violle, qui remplit ces conditions, a été adopté par la Conférence internationale.

En conséquence, l'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise normalement par 1 centimètre carré de platine à la température de solidification.

L'unité pratique de lumière blanche est la lumière totale émise par 1 centimètre carré de platine à la température de solidification.

Il résulte des études de M. Violle que le bec carcel a une intensité lumineuse égale à $\frac{1}{2,08}$; on doit donc employer les chiffres suivants :

Étalon de platine	1
Lampe Carcel	0,481
Bougie anglaise de spermaceti	0,058
Bougie allemande de paraffine	0,064
Bougie stéarique de Munich	0,074
Bougie stéarique de l'Étoile, de 5 au paquet.	0,065
Bougie stéarique de l'Étoile, de 6 au paquet.	0,063

Comme l'unité de M. Violle était trop grande pour la pratique, le Congrès des Electriciens de 1889 a adopté la *bougie décimale* égale à $\frac{1}{20}$ de l'unité de M. Violle. Il résulte de là que la bougie décimale équivaut à $\frac{1}{10}$ de Carcel.

L'étalon de platine est peu commode pour les expériences industrielles. Aussi continue-t-on à se servir généralement comme étalons du bec Carcel et de la bougie. Toutefois, pour avoir des résultats comparables entre eux, on doit prendre la valeur de ces derniers en fonction de l'unité admise par la Conférence.

49. Eclairement. — Les considérations précédentes montrent que la comparaison de deux foyers se fait au moyen de leurs intensités lumineuses; mais, en opérant ainsi, on n'obtient pas une expression suffisamment pratique de leurs mérites au point de vue de l'éclairage. Dans celui-ci, en effet, le problème à résoudre est de produire en chaque point de l'espace à éclairer un *éclairement* suffisant ; ce qu'il importe donc surtout, c'est de constater les effets produits. On a été ainsi amené à créer une nouvelle unité.

L'unité d'éclairement actuellement adoptée est la *bougie-mètre*, c'est-à-dire l'éclairement produit sur une surface de quelque étendue par une bougie placée à une distance de 1 mètre.

Pour avoir une idée de l'éclairement ainsi pris pour unité, il suffit de savoir que, d'après les recherches de M. Cohn, professeur à l'Université de Breslau, il faut 50 bougies-mètre pour qu'on puisse, en se plaçant à une distance de 1 mètre de la source lumineuse, lire un journal aussi facilement qu'à la lumière du jour ; tout bon éclairage doit fournir un éclairement de 30 bougies-mètre en un point quelconque du local éclairé.

CHAPITRE III

MESURES

50. — Les mesures électriques servent à évaluer les divers éléments par lesquels nous avons défini les propriétés d'un circuit électrique : différence de potentiel, intensité, résistance, quantité et capacité.

Pour chacun de ces éléments, les méthodes et, par suite, les appareils à employer sont très nombreux. Les uns s'appliquent surtout dans les recherches scientifiques ; les autres concernent plus particulièrement l'industrie ; ce sont ces derniers que nous examinerons en détail.

Enfin, nous étudierons aussi les mesures de l'intensité lumineuse et de l'énergie mécanique, qui ont acquis une importance considérable pour les électriciens depuis les récentes applications de l'électricité à l'éclairage et à la transmission de la force.

Parmi les appareils électriques de mesures, il faut distinguer ceux qui donnent la valeur des éléments électriques et ceux qui indiquent simplement l'existence d'un courant. Ces derniers ont gardé le nom de *galvanomètres* qui leur avait été donné à l'origine ; à proprement parler, ce sont plutôt des *galvanoscopes*. Ils servent aussi à comparer entres elles les propriétés de deux courants. Nous allons les examiner tout d'abord, mais d'une façon très sommaire.

Avant de commencer cette étude, nous devons faire immédiatement une remarque importante. Il faut avoir soin, lorsqu'on emploie des appareils qui possèdent une aiguille aimantée mobile, de tenir à l'écart les masses de fer et d'acier qui agissent sur

Étalon de platine	1
Lampe Carcel	0,481
Bougie anglaise de spermaceti	0,058
Bougie allemande de paraffine	0,064
Bougie stéarique de Munich	0,074
Bougie stéarique de l'Étoile, de 5 au paquet.	0,065
Bougie stéarique de l'Étoile, de 6 au paquet.	0,063

Comme l'unité de M. Violle était trop grande pour la pratique le Congrès des Electriciens de 1889 a adopté la *bougie décimale* égale à $\frac{1}{20}$ de l'unité de M. Violle. Il résulte de là que la bougie décimale équivaut à $\frac{1}{10}$ de Carcel.

L'étalon de platine est peu commode pour les expériences industrielles. Aussi continue-t-on à se servir généralement comme étalons du bec Carcel et de la bougie. Toutefois, pour avoir des résultats comparables entre eux, on doit prendre la valeur de ces derniers en fonction de l'unité admise par la Conférence.

49. Eclairement. — Les considérations précédentes montrent que la comparaison de deux foyers se fait au moyen de leurs intensités lumineuses; mais, en opérant ainsi, on n'obtient pas une expression suffisamment pratique de leurs mérites au point de vue de l'éclairage. Dans celui-ci, en effet, le problème à résoudre est de produire en chaque point de l'espace à éclairer un *éclairement* suffisant ; ce qu'il importe donc surtout, c'est de constater les effets produits. On a été ainsi amené à créer une nouvelle unité.

L'unité d'éclairement actuellement adoptée est la *bougie-mètre*, c'est-à-dire l'éclairement produit sur une surface de quelque étendue par une bougie placée à une distance de 1 mètre.

Pour avoir une idée de l'éclairement ainsi pris pour unité, il suffit de savoir que, d'après les recherches de M. Cohn, professeur à l'Université de Breslau, il faut 50 bougies-mètre pour qu'on puisse, en se plaçant à une distance de 1 mètre de la source lumineuse, lire un journal aussi facilement qu'à la lumière du jour ; tout bon éclairage doit fournir un éclairement de 30 bougies-mètre en un point quelconque du local éclairé.

CHAPITRE III

MESURES

50. — Les mesures électriques servent à évaluer les divers éléments par lesquels nous avons défini les propriétés d'un circuit électrique : différence de potentiel, intensité, résistance, quantité et capacité.

Pour chacun de ces éléments, les méthodes et, par suite, les appareils à employer sont très nombreux. Les uns s'appliquent surtout dans les recherches scientifiques ; les autres concernent plus particulièrement l'industrie ; ce sont ces derniers que nous examinerons en détail.

Enfin, nous étudierons aussi les mesures de l'intensité lumineuse et de l'énergie mécanique, qui ont acquis une importance considérable pour les électriciens depuis les récentes applications de l'électricité à l'éclairage et à la transmission de la force.

Parmi les appareils électriques de mesures, il faut distinguer ceux qui donnent la valeur des éléments électriques et ceux qui indiquent simplement l'existence d'un courant. Ces derniers ont gardé le nom de *galvanomètres* qui leur avait été donné à l'origine ; à proprement parler, ce sont plutôt des *galvanoscopes*. Ils servent aussi à comparer entres elles les propriétés de deux courants. Nous allons les examiner tout d'abord, mais d'une façon très sommaire.

Avant de commencer cette étude, nous devons faire immédiatement une remarque importante. Il faut avoir soin, lorsqu'on emploie des appareils qui possèdent une aiguille aimantée mobile, de tenir à l'écart les masses de fer et d'acier qui agissent sur

l'aiguille et modifient d'une façon très sensible les déviations obtenues.

GALVANOMÈTRES

51. Multiplicateur de Schweigger. — Le principe des galvanomètres repose sur l'expérience d'Œrsted qui, en approchant un conducteur traversé par un courant d'une aiguille aimantée mobile, observa la déviation de cette dernière. Tout appareil dans lequel une aiguille aimantée est déviée par un courant constitue un galvanomètre.

Mais, comme l'action de la terre tend à maintenir une aiguille aimantée dans le méridien magnétique ou à l'y ramener lorsqu'elle en est écartée, la disposition adoptée par Œrsted ne donne à l'aiguille que des déplacements à peine appréciables, surtout lorsqu'on opère avec des courants peu intenses.

Schweigger rendit l'action du courant plus sensible en enroulant le conducteur un grand nombre de fois, et toujours dans le même sens, sur un cadre rectangulaire, et en plaçant l'aiguille dans l'intérieur de ce cadre. Les différents tours du fil exercent alors des actions concordantes dont la résultante produit une déviation suffisante de l'aimant. Cet appareil a reçu le nom de *multiplicateur de Schweigger*.

52. Système astatique. — La sensibilité du multiplicateur est encore augmentée si l'on soustrait en partie l'aiguille à l'action de la terre, comme l'a fait Nobili avec son système *astatique*.

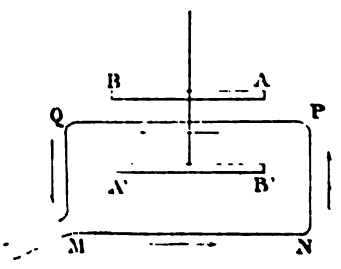


Fig. 12.

Deux aiguilles aimantées AB, A'B', solidaires l'une de l'autre (fig. 12), sont suspendues de telle sorte que leurs pôles contraires se trouvent en regard, la première à l'extérieur, la deuxième à l'intérieur du cadre galvanométrique. Si les deux aiguilles sont identiques pour la grandeur et le degré d'aimanta-

tion, les actions de la terre sur chacune d'elles se neutralisent complètement, et le système reste en équilibre dans une position quelconque. Mais il suffit de la plus légère inégalité entre elles, pour que la terre reprenne son effet directeur et oriente le système suivant le méridien magnétique ; seulement son influence se trouve considérablement diminuée.

Les actions concordantes des quatre côtés du rectangle MNPQ tendent à porter le pôle austral A′ en avant du plan de la figure ; le côté PQ produit le même effet sur le pôle B de l'aiguille AB, tandis que les actions contraires des trois autres côtés du rectangle sur la même aiguille AB sont peu sensibles à cause de la distance. L'action du cadre sur le système astatique est donc plus forte que celle qu'il exercerait sur une seule aiguille.

Pour ces deux raisons, diminution de l'influence de la terre, augmentation de l'action du courant, la sensibilité de l'appareil se trouve beaucoup plus grande.

53. Galvanomètre ordinaire. — Le galvanomètre ordinaire n'est autre chose qu'un système astatique disposé, comme nous venons de le voir, dans l'intérieur d'un cadre multiplicateur, et dont l'aiguille supérieure se meut sur un cercle divisé horizontal. Le système des aiguilles est suspendu à un fil de cocon et renfermé dans une cloche cylindrique en verre.

Nous devons ajouter que cet appareil est actuellement très peu employé parce que les déviations sont assez faibles et, par suite, très difficiles à observer.

54. Galvanomètre à réflexion de sir W. Thomson. — Le galvanomètre de sir W. Thomson ne présente pas cet inconvénient.

Son principe est d'employer une aiguille aimantée très légère sur laquelle est fixé un petit miroir. Un rayon lumineux tombe sur ce miroir et se réfléchit sur une échelle divisée placée à une distance d'un mètre environ, en donnant une image qui se déplace suivant la déviation du miroir et, par suite, de l'aiguille. La position de cette image indique l'intensité du courant qui traverse l'appareil, et la lecture de la déviation se trouve très facilitée.

L'aiguille de ce galvanomètre est fort petite et n'a que 8 milli-

mètres de longueur environ. Elle est placée au dos d'un miroir de forme circulaire dont le diamètre est égal à la longueur de l'aiguille. Ce système est suspendu par un fil de cocon très ténu au centre de la bobine inductrice. Au-dessous de l'échelle divisée se trouve une fente étroite devant laquelle est une lampe; cette rainure laisse passer un faisceau lumineux qu'on fait converger sur le miroir au moyen d'une lentille bi-convexe.

Enfin, on soustrait l'appareil à l'action perturbatrice de la terre en plaçant un aimant à la partie supérieure du galvanomètre. Cet aimant est mobile dans un plan horizontal et peut recevoir l'orientation nécessaire pour rendre, au début d'une expérience, le miroir perpendiculaire au rayon lumineux, c'est-à-dire pour amener l'image au zéro de l'échelle. Il peut de plus glisser verticalement le long de l'axe, de façon que son action sur l'aiguille soit modifiée à volonté ; plus le courant à étudier est faible, plus cet aimant doit être éloigné de l'aiguille.

Emploi de l'appareil. — Avant de mettre le galvanomètre en expérience, il faut le placer de niveau au moyen des vis calantes qui le supportent. Puis, on monte ou l'on abaisse l'aimant suivant les besoins, de façon à diminuer ou à augmenter son action sur l'aiguille.

Cela fait, on place l'échelle à environ 1 mètre du galvanomètre, parallèlement au plan des bobines galvanométriques et de telle sorte que la perpendiculaire menée à cette échelle par la fente lumineuse tombe sur le miroir. On règle la largeur de cette fente au moyen d'une petite coulisse métallique qui permet de la faire varier; on met ensuite la lentille sur la ligne qui joint la fente lumineuse au miroir et dans une position telle que ces deux points soient aux foyers conjugués de la lentille. Cette position se trouve par tâtonnements.

On amène alors l'image lumineuse à être au zéro de l'échelle, d'abord en faisant tourner l'aimant directeur, et ensuite en agissant sur une petite vis qui donne au miroir des déplacements micrométriques.

Tous ces préparatifs terminés, on peut intercaler le galvanomètre dans le circuit électrique.

Cet appareil étant excessivement sensible, on ne saurait prendre

trop de soins pour éloigner les objets en fer ou en acier qui peuvent se trouver dans le voisinage de l'endroit où l'on opère.

55. — Dans certains modèles, l'action de la terre est éliminée non pas par un aimant, mais au moyen d'un système astatique de

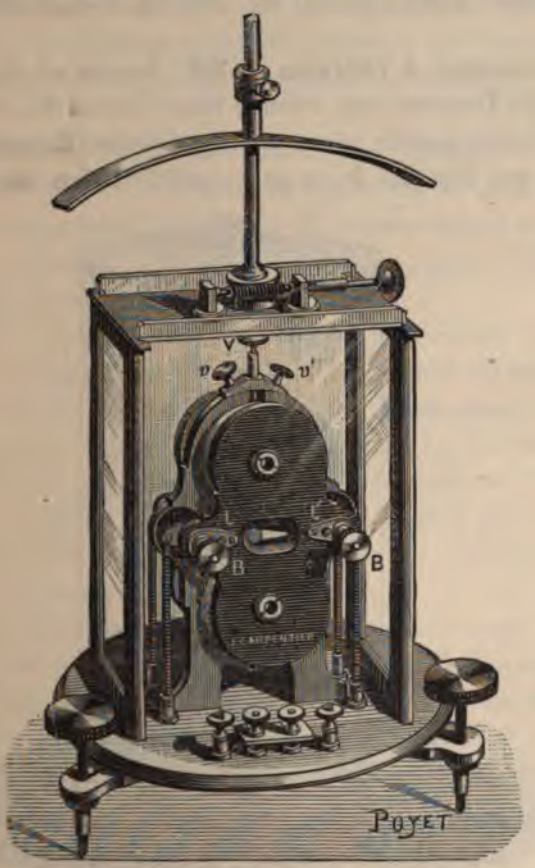


Fig. 13.

deux aiguilles aimantées. Chacune de ces aiguilles se trouve alors au centre d'une bobine, et l'une d'elles porte le miroir (fig. 13). L'aimant directeur sert, dans ce cas, à modifier la sensibilité de l'appareil suivant les besoins.

Le galvanomètre de Thomson possède une extrême sensibilité ; il est très employé dans les expériences de précision et dans les

mesures de laboratoire dont nous parlerons plus loin. Aussi la plus grande stabilité lui est-elle indispensable ; on le place ordinairement sur une table de pierre, mise à l'abri des trépidations et scellée à un mur épais ou sur un pilier de maçonnerie. On peut encore poser cette table de pierre sur un fort bâti en bois dont les quatre pieds reposent sur des rondelles de caoutchouc.

56. Galvanomètre à réflexion de MM. Deprez et d'Arsonval. — L'appareil de Thomson est, comme nous l'avons dit, extrêmement sensible, et cette qualité même peut quelquefois devenir un défaut, en ce sens que l'emploi de ce galvanomètre exige une installation

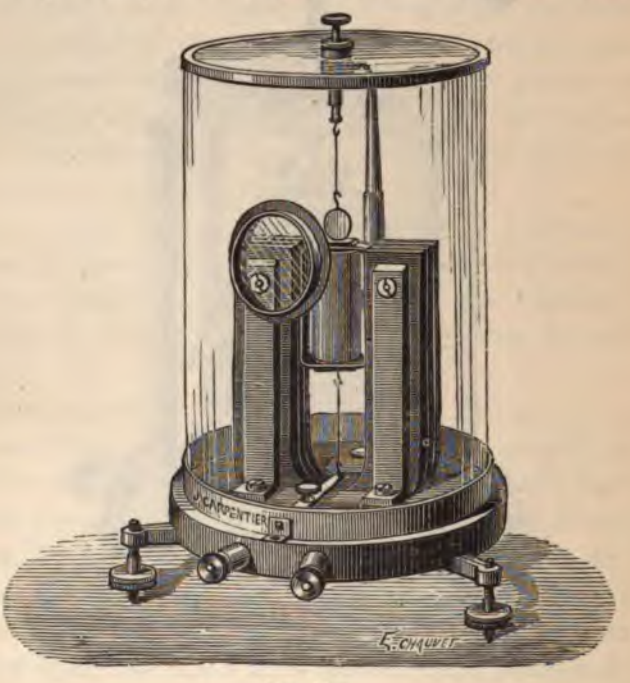


Fig. 14.

très soignée et de grandes précautions, ce qui est souvent difficile à réaliser dans l'industrie. Dans ce cas, on préfère prendre un instrument plus maniable et moins compliqué ; le galvanomètre de MM. Deprez et d'Arsonval peut rendre alors des services, car il possède ces deux qualités tout en donnant des mesures d'une très grande exactitude.

Dans cet appareil (fig. 14), l'aimant est fixe et c'est le cadre traversé par le courant qui est mobile. Il résulte de cette disposition que les mouvements de ce cadre dans le champ magnétique y déterminent des courants d'induction; l'effet de ceux-ci consiste à arrêter les oscillations du cadre et à amener rapidement ce dernier à sa position d'équilibre, ce qu'on exprime en disant que l'appareil est *apériodique*. C'est un avantage de l'instrument sur le galvanomètre Thomson dont l'aiguille est toujours très longue à s'arrêter.

Le galvanomètre Deprez et d'Arsonval se compose d'un puissant aimant permanent vertical, entre les pôles duquel peut se mouvoir un cadre rectangulaire formé d'un fil excessivement fin. Un tube en fer doux, placé à l'intérieur du cadre, augmente l'intensité du champ magnétique.

Le cadre est maintenu à ses extrémités supérieure et inférieure par deux fils d'argent très ténus. Le fil supérieur est attaché à une tige à laquelle on peut donner soit un mouvement de rotation, soit un mouvement de translation verticale. Le but de ces deux fils est multiple : ils servent à maintenir le cadre et à lui amener le courant; de plus, le couple de torsion, produit par un déplacement angulaire du cadre, permet de mesurer l'action réciproque du cadre et de l'aimant.

Enfin, les déviations produites par le courant étant trop faibles pour être observées directement, on rend les lectures plus faciles en faisant tomber un rayon lumineux sur un petit miroir porté par le cadre et en observant l'image obtenue sur une échelle divisée.

Cet appareil possède une très grande sensibilité ; on peut en donner une idée en disant qu'il accuse nettement un courant dont l'intensité est d'un dix-millionième d'ampère. Il est d'un emploi très commode et est fort appliqué, le galvanomètre Thomson étant spécialement réservé pour les mesures des capacités électriques.

Emploi de l'appareil.—On commence par rendre le plan du cadre vertical au moyen des trois vis calantes placées sous le socle; puis on l'amène dans le plan de l'aimant en agissant sur la vis placée au-dessus de l'appareil. Cela fait, on dirige un rayon lumi-

neux sur le miroir, de façon que ce rayon arrive perpendiculairement à la surface du miroir, et l'on place l'échelle à un mètre environ du miroir. L'appareil se trouve alors prêt pour l'expérience, et l'on n'a plus qu'à le mettre en circuit au moyen des deux bornes.

Les deux galvanomètres que nous venons de décrire peuvent servir à indiquer l'existence d'un courant électrique dans un circuit. Ils sont plus souvent employés pour les mesures de forces électromotrices et de résistances, comme nous le verrons plus loin.

57. — Il est évident que la disposition adoptée pour faire tom-

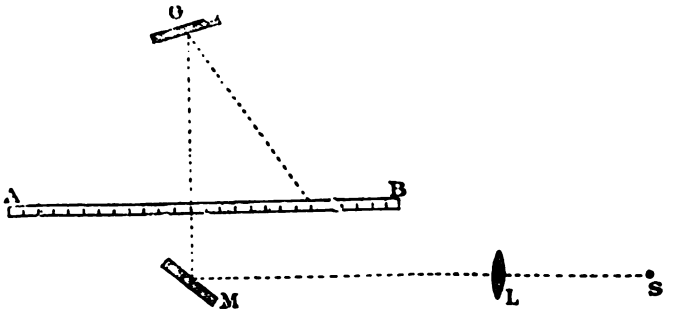


Fig. 15.

ber un faisceau lumineux sur le miroir du galvanomètre peut être différente de celle indiquée plus haut. C'est ainsi que M. Carpentier a proposé la combinaison suivante, fort commode pour la manipulation des appareils :

La source lumineuse S (fig. 15) est quelconque, lampe, bougie ou bec de gaz. Les rayons lumineux traversent une lentille L qui les rend parallèles, et tombent sur un premier miroir M d'où ils sont renvoyés au galvanomètre G ; il se forme ainsi un champ lumineux dans lequel se détache un réticule placé verticalement sur le chemin des rayons, et c'est l'image de ce réticule que le galvanomètre donne sur l'échelle AB faite en celluloïd. Cette image est vue par transparence sur l'échelle.

On peut même supprimer la source lumineuse S et la lentille L, et se servir tout simplement des rayons du jour que l'on projette

sur le galvanomètre au moyen du miroir M. C'est la manière la plus simple de disposer l'expérience.

58. Shunt. — L'emploi des galvanomètres de précision demande une précaution très importante, c'est qu'on ne fasse pas traverser l'appareil par un courant énergique qui pourrait en modifier l'aimantation, ou chauffer le fil fin de la bobine au point de détruire la matière isolante dont il est recouvert. De plus, lorsque l'appareil possède une grande sensibilité, il arrive très souvent que la déviation de l'aiguille est trop forte et que l'image lumineuse sort des divisions de l'échelle.

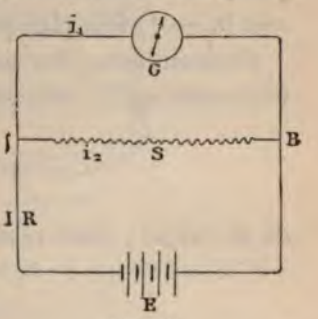


Fig. 16.

Pour toutes ces raisons, on a recours à un artifice, et l'on n'envoie dans la bobine du galvanomètre qu'une certaine fraction du courant, au lieu du courant tout entier. On place pour cela entre les deux bornes du galvanomètre un conducteur de dérivation ou, suivant l'expression anglaise consacrée par l'usage, un *shunt*.

On peut d'ailleurs calculer la résistance du shunt de façon à faire subir au courant telle modification que l'on désire, et à ne laisser passer dans le galvanomètre qu'une fraction déterminée du courant.

Soient I l'intensité du courant total, i_1 l'intensité du courant dérivé passant par le galvanomètre, i_2 celle de la dérivation passant par le shunt (fig. 16). Soient S la résistance du shunt et G celle du galvanomètre ; on a, en appliquant les lois de Kirchhoff, (§ 6) au point A et au circuit AGBS :

$$I - i_1 - i_2 = 0$$
$$i_1 G = i_2 S.$$

En éliminant i_2 entre ces deux équations et résolvant par rapport à i_1, on obtient :

$$i_1 = I \times \frac{S}{G + S}$$

Ainsi, l'intensité dans le galvanomètre est réduite proportion-

nellement à la quantité $\frac{S}{G+S}$. Si donc on veut la diminuer dans le rapport $\frac{1}{n}$, il faudra avoir

$$\frac{S}{G+S} = \frac{1}{n};$$

d'où

$$S = G\frac{1}{n-1}.$$

Donc, pour que l'intensité dans le galvanomètre soit la $n^{ième}$ partie de l'intensité totale, il faudra que la résistance du shunt soit $(n-1)$ fois plus petite que celle du galvanomètre.

Ordinairement les shunts sont établis par les constructeurs de telle sorte qu'ils réduisent l'intensité du courant à

$$\frac{1}{10}, \frac{1}{100} \text{ et } \frac{1}{1\,000}$$

de sa valeur ; leurs résistances sont, par suite :

$$\frac{1}{9}, \frac{1}{99} \text{ et } \frac{1}{999}$$

de celle du galvanomètre.

Il est important de remarquer que l'introduction d'un shunt diminue la résistance entre les bornes du galvanomètre (§ 8) et augmente, par suite, l'intensité du courant primitif. Si on a intérêt à conserver à celle-ci sa valeur, il faut ajouter une certaine résistance dans le circuit principal. Cette résistance ρ se calcule de la manière suivante :

Sans shunt la résistance est G ; avec le shunt elle est $\frac{GS}{G+S}$; donc

$$\rho = G - \frac{GS}{G+S} = \frac{G^2}{G+S}.$$

59. — Les shunts des galvanomètres se composent de bobines dont les résistances sont déterminées à l'avance suivant les galvanomètres auxquels ils doivent être joints. Les extrémités des fils de ces bobines sont fixées à des plaques de laiton isolées les unes des autres et placées à la partie supérieure de l'appareil (fig. 17). Ces plaques communiquent entre elles par les bobines ; mais elles

peuvent être reliées directement au moyen de chevilles en laiton qu'on introduit dans des échancrures disposées à cet effet.

Lorsque ces chevilles sont en place, un courant qui traverse l'appareil passe d'une plaque de laiton à une autre par l'intermédiaire de la cheville qui les réunit. Si cette cheville est ôtée, le

Fig. 17.

Fig. 18.

courant circule dans la bobine correspondante et la résistance de cette bobine se trouve insérée dans le circuit.

Les formes que les constructeurs donnent aux shunts varient beaucoup. La figure 18 représente une disposition assez pratique.

MESURE DE L'INTENSITÉ

60. — Les appareils qui servent dans l'industrie à mesurer l'intensité d'un courant peuvent se diviser en trois classes, suivant le principe sur lequel ils reposent :

1° Les galvanomètres, boussoles, ampèremètres sont fondés sur l'action d'un courant sur un aimant;

2° Les électro-dynamomètres utilisent les actions électro-dynamiques, c'est-à-dire les actions des courants sur les courants;

3° Enfin, les appareils électrolytiques donnent des mesures qui résultent des décompositions électrochimiques.

Les galvanomètres industriels, appelés *ampèremètres* ou quelquefois *ammètres*, parce qu'ils donnent la valeur des courants en ampères, sont de beaucoup les plus nombreux et les plus employés; ils réalisent, comme nous le verrons plus loin, les condi-

tions nécessaires aux mesures industrielles, et leurs applications se multiplient chaque jour. Les électrodynamomètres sont moins répandus ; ils rendent cependant des services dans certains cas où l'on ne peut avoir recours aux galvanomètres, avec les courants alternatifs par exemple. Quant aux appareils de décompositions électrochimiques, ils servent plus rarement.

Avant de commencer l'étude de ces instruments, nous avons une remarque fort importante à faire sur leur emploi.

Tous les appareils qui servent à mesurer les intensités doivent être mis directement dans le circuit, afin d'être traversés par le courant même que l'on veut étudier. Si on les place en dérivation, il faut alors tenir compte des résistances et corriger le résultat de l'expérience par le calcul.

61. Ampèremètre de MM. Deprez et Carpentier. — Dans un champ magnétique puissant formé par les deux aimants, AB, A'B' (fig. 19) est placé un cadre galvanométrique au centre duquel est une pièce de fer doux, mobile sur un axe vertical et portant un index (non indiqué sur la figure).

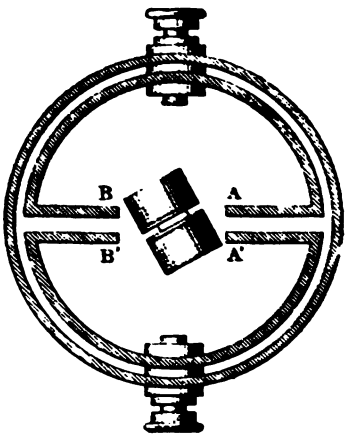


Fig. 19.

Le passage du courant dans le cadre modifie les lignes de force du champ magnétique, la pièce de fer doux est déplacée, et l'index marque sur un cadran gradué une déviation donnant la mesure du courant.

Le cadre galvanométrique est formé de deux bobines cylindriques très rapprochées l'une de l'autre et reliées en quantité ; elles comprennent entre elles l'axe qui porte la pièce de fer doux mobile.

De plus, les bobines sont placées *obliquement* par rapport aux lignes de force du champ magnétique. Cette disposition a pour effet de doubler l'angle de déviation dans un sens pour une intensité donnée, et de l'annuler dans l'autre. Il faut donc que le courant traverse l'appareil dans un sens déterminé, et, cette condition satisfaite, on obtient des déviations plus grandes et, par suite, plus

précises qui permettent d'apprécier assez facilement le demi-ampère.

L'obliquité de la double bobine peut être changée à volonté pour le réglage de l'appareil. Cette bobine est formée de lames de cuivre rouge présentant 10 millimètres de largeur et une épaisseur variable suivant les courants auxquels l'appareil est destiné.

La graduation devant laquelle se meut l'aiguille sur le cadran étant tracée empiriquement, il suffit de lire la division à laquelle s'arrête l'aiguille pour avoir le nombre d'ampères cherché.

L'appareil, tel qu'il vient d'être décrit, permet de mesurer les courants compris entre 0 et 50 ampères ; mais il n'est pas suffisant lorsque l'intensité dépasse cette valeur. On lui adjoint alors un réducteur ou shunt, qui se fixe sous l'ampèremètre et en réduit la sensibilité. Ce réducteur se compose simplement d'une lame de cuivre rouge, placée en dérivation sur la bobine de l'ampèremètre ; cette lame se trouve ainsi traversée par une partie du courant.

Les réducteurs construits par M. J. Carpentier sont de trois modèles : le réducteur n° 1 a la même résistance que l'ampèremètre ; le réducteur n° 2 a une résistance moitié moindre ; le réducteur n° 3, une résistance 3 fois plus petite : ils permettent respectivement de mesurer les courants de 0 à 100, 150, et 200 ampères. Pour déduire le nombre d'ampères du chiffre lu sur l'échelle, il faut multiplier ce dernier par 2 pour le réducteur n° 1, par 3 pour le réducteur n° 2, par 4 pour le réducteur n° 3 ; car dans chacun de ces cas il ne passe dans l'ampèremètre que la moitié, le tiers et le quart du courant à mesurer.

Emploi de l'appareil. — L'appareil se place directement dans le circuit, en reliant le pôle positif à la borne de gauche, et le pôle négatif à la borne de droite. Lorsqu'on ne connaît pas le sens du courant, on intercale l'ampèremètre dans le circuit d'une façon quelconque ; si l'aiguile se meut vers la gauche, en dehors de l'échelle, il faut intervertir les communications.

Quand on emploie un réducteur, on place celui-ci sous l'ampèremètre ; on serre fortement les lames qui relient les bornes de l'ampèremètre et celles du réducteur, et l'on attache les conducteurs à ces dernières, le pôle positif à gauche, le pôle négatif à droite.

L'ampèremètre de MM. Deprez et Carpentier, spécialement des-

tiné aux mesures d'atelier, présente l'avantage d'être d'un usage simple et d'une construction solide; il peut être placé entre les mains de tous les ouvriers.

62. Ammètre de MM. Ayrton et Perry. — MM. Ayrton et Perry ont construit un galvanomètre industriel dont les petites dimensions rendent l'usage commode et qui, tout en donnant des indications instantanées, est susceptible d'être employé avec de très forts courants.

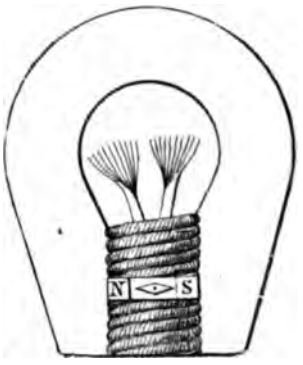


Fig. 20.

Il comprend un aimant puissant en fer à cheval (fig. 20), placé horizontalement et portant deux armatures en fer doux N, S, entre lesquelles se trouve l'aiguille horizontale, munie d'un index mobile sur un cadran divisé. La bobine galvanométrique est formée de deux parties placées en avant et en arrière de l'aiguille.

C'est dans cette bobine que réside la particularité de l'appareil. Le câble qui la constitue se compose en effet de 10 fils fins isolés les uns des autres, qui, au moyen d'un commutateur placé à la partie postérieure de l'ammètre, peuvent être réunis soit en série, soit en quantité (fig. 21). Chacun de ces fils a une résistance de 0,03 ohm ; leur résistance totale est de 0,3 lorsqu'ils sont en série, et de 0,003 lorsqu'ils sont en quantité [1]. (Cette dernière valeur doit être légèrement augmentée à cause de la résistance des points de contact et des conducteurs accessoires.) Or l'action exercée par un conducteur sur une aiguille aimantée est proportionnelle à la longueur de ce conducteur et à l'intensité du courant. Mais la longueur du fil inducteur est la même, que les dix fils soient en série ou en quantité. Quant à l'intensité, elle est dix fois plus petite dans

[1] Lorsque plusieurs appareils ou conducteurs sont placés à la suite les uns des autres de façon à ne former qu'un seul circuit, on dit qu'ils sont disposés *en série* ou en *tension;* dans ce cas chacun d'eux est traversé par le courant total. Quand ces appareils sont placés sur des déviations du circuit principal, on dit qu'ils sont disposés en *quantité* ou en *déviation.* Dans ce cas, chacun d'eux ne reçoit qu'une fraction du courant total.

le premier cas que dans le second. Donc un courant donné produira, lorsque ces fils sont réunis en quantité, une déviation dix fois plus petite que si les fils étaient en tension, ou encore la même déviation qu'un courant dix fois plus faible passant dans les fils réunis en tension.

Grâce à cette disposition, l'ammètre peut mesurer un courant

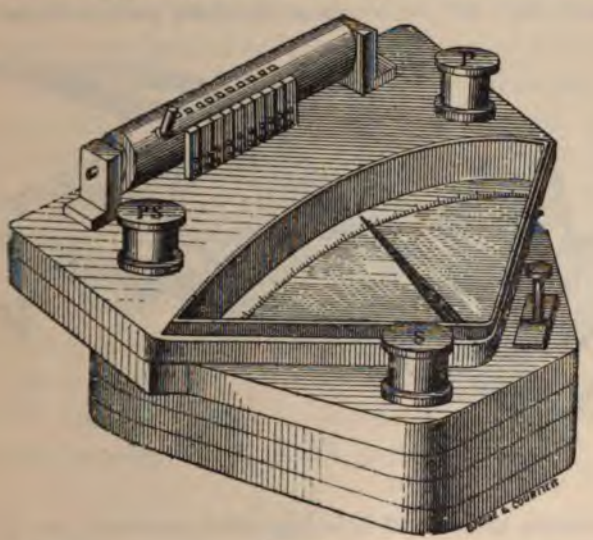


Fig. 21.

de 0 à 9 ampères avec les fils en tension, et un courant de 0 à 90 ampères avec les fils en quantité.

De plus, comme on pourrait courir le danger de brûler l'instrument si on envoyait un courant trop intense lorsque les fils sont disposés en série, l'ammètre possède trois bornes différentes auxquelles il faut fixer les conducteurs suivant les mesures que l'on a à faire.

Emploi de l'appareil. — Si le courant à mesurer est inférieur à 9 ampères, on emploie la disposition en série, et on réunit les extrémités du circuit aux bornes S, PS (fig. 21).

Lorsque, au contraire, le courant dépasse 9 ampères, on doit prendre les fils de la bobine en quantité et on se sert de bornes PS, P.

63. Ampèremètre de William Thomson. — Les appareils que nous

venons de décrire sont très utiles dans les installations industrielles de lumière électrique, de transport de force ou de galvanoplastie. Mais lorsqu'il s'agit de mesures plus précises, quand on veut, par exemple, étudier le fonctionnement d'une machine, leurs indications ne sont pas exactes. Il est alors préférable d'employer l'ampèremètre de sir W. Thomson.

L'appareil (fig. 22) se compose de deux parties distinctes, l'ai-

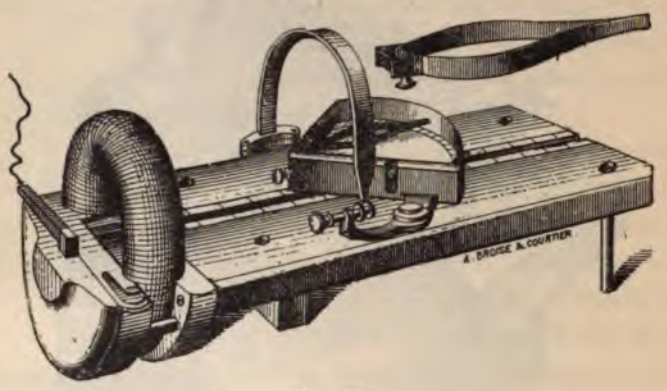


Fig. 22.

guille aimantée mobile, et la bobine fixe traversée par le courant à mesurer. Le pivot de l'aiguille est vertical et placé à une certaine distance de la bobine. L'aiguille s'oriente sous l'action du magnétisme terrestre et dévie de sa position d'équilibre lors du passage du courant.

La bobine, qui a la forme d'un tore, comprend six tours d'une lame en cuivre d'une section de 28 millimètres carrés, isolés les uns des autres par du papier d'amiante. Elle est fixée verticalement à l'extrémité d'une planchette en bois horizontale reposant sur des vis calantes. L'aiguille aimantée est formée par l'ensemble de quatre petits barreaux en acier d'un centimètre de longueur, parallèles entre eux; ils constituent un équipage mobile autour de l'axe vertical et relié à un index en aluminium qui se déplace devant un cercle divisé. (Le tout est indiqué à part sur la figure 22.)

Enfin, l'aiguille aimantée et son index sont enfermés dans un secteur que l'on peut déplacer le long d'une rainure pratiquée au milieu de la planchette et dans le sens de sa longueur. Cette dis-

position permet de faire varier à volonté la distance entre l'aiguille et la bobine; on réduit ainsi suivant les besoins, l'action de la bobine et, par suite, la sensibilité de l'appareil.

Il en résulte que l'instrument comporte deux graduations : l'une correspond à la déviation de l'aiguille sur le secteur, l'autre à la distance de l'aiguille à la bobine; celle-ci est donnée par des divisions marquées sur la planchette.

Ces divisions sont tracées par le constructeur de telle façon que l'aiguille, placée dans un champ magnétique d'intensité égale à l'unité, donne aux distances numérotées 1. 2. 3... etc., des déviations respectivement égales à 1. 2. 3., etc..., lorsque l'intensité du courant est égale à 1 ampère. En d'autres termes, en mettant le front du secteur en regard des divisions 1. 2. 3..., etc., le nombre de divisions indiqué par l'index correspond exactement au nombre d'ampères du courant mesuré, à la condition toutefois que l'intensité du champ magnétique qui entoure l'aiguille soit égale à l'unité.

Mais comme l'intensité de ce champ est celle du magnétisme terrestre et non pas l'unité, le résultat obtenu doit être multiplié par cette intensité. On a donc la formule

$$I = \frac{H \times d}{n} \text{ ampères,} \qquad (1)$$

dans laquelle I représente l'intensité du courant, H la composante horizontale du magnétisme terrestre, d le nombre de divisions lu sur le secteur, n le nombre de divisions lu sur la planchette.

Lorsqu'on fait une série de mesures sans déplacer l'aiguille, on calcule une fois pour toutes la fraction $\frac{H}{n}$, et l'on n'a plus qu'à multiplier cette constante par la déviation d pour connaître l'intensité I.

Avant de se servir de l'appareil, il est nécessaire de déterminer la valeur de H qui varie avec le milieu dans lequel l'appareil est placé, suivant la présence dans son voisinage d'une masse de fer plus ou moins considérable. L'opération est d'ailleurs très facile : on fait traverser l'ampèremètre par un courant d'intensité connue I, on place l'aiguille à une distance n et on lit la déviation d. Dans ces conditions, H s'extrait de la formule précédente et l'on a

$$H = \frac{In}{d}.$$

L'appareil ainsi construit permet de mesurer des intensités assez faibles ; il n'est plus suffisant lorsque le courant est énergique. Dans ce cas, on place au-dessus de l'aiguille un aimant directeur, en forme de demi-cercle, qui réduit la sensibilité.

Il faut alors ajouter à H dans la formule (1) l'intensité F du champ magnétique de l'aimant, intensité qui est indiquée sur l'aimant lui-même. On a ainsi

$$I = \frac{(H + F)\,d}{n}. \qquad (2)$$

D'un autre côté, cet aimant peut s'affaiblir avec le temps ; il est donc bon d'en vérifier la valeur. On procède de la façon suivante pour déterminer la quantité H + F :

On place le front du secteur devant la division 1/2, par exemple, de la planchette, sans aimant directeur, avec quelques éléments dans le circuit de la bobine. Supposons que la déviation de l'aiguille soit de 15,2 divisions ; soit 0,193 la valeur de H au point où l'on fait l'expérience. L'intensité du courant s'obtient par la formule (1)

$$I = \frac{15,2}{\frac{1}{2}} \times 0,193 = 5,8673 \text{ ampères.}$$

On met ensuite l'aimant à mesurer et on rapproche le secteur de la bobine jusqu'à la division 32, par exemple, en conservant le même courant. Supposons que la déviation correspondante soit 24 ; on aura :

$$\frac{24}{32}(H + F) = 5,8673$$

d'où

$$H + F = 7,823.$$

7,823 sera la valeur à employer pour l'action simultanée de l'aimant et du magnétisme terrestre.

Dans ces conditions, l'ampèremètre peut être employé avec des courants variant entre 0,005 et 150 ampères. En modifiant la construction de la bobine et la formant d'une seule pièce en cuivre de 225 millimètres carrés de section, on peut mesurer des courants plus énergiques, variant entre 0,02 et 700 ampères.

En général, la graduation de la planchette commence à 45, chiffre d'extrême sensibilité, et finit à 1/2, avec un aimant d'intensité magnétique à peu près égale à 7. On peut donc avec l'aimant directeur mesurer les courants depuis 0,16 ampère (valeur pour laquelle on a une déviation de 1 division à la position d'extrême sensibilité). Au-dessous de cette valeur, il faut supprimer l'aimant et orienter l'aiguille ; dans ce cas, un courant de 0,01 ampère donne encore une déviation de 2,3 divisions. L'appareil est, on le voit, extrêmement sensible.

Emploi de l'appareil. — Lorsqu'il s'agit de courants que l'on suppose supérieurs à 0,5 ampère, on emploie l'aimant directeur. Il suffit de placer l'ampèremètre directement dans le circuit et d'éloigner plus ou moins l'aiguille, de façon à avoir une déviation suffisamment grande. Cela fait, on lit la déviation et la division de la planchette, et l'on applique la formule (2).

Lorsque le courant est estimé inférieur à 0,5 ampère, on supprime l'aimant et l'on oriente l'appareil de façon que l'index de l'aiguille soit au zéro de la graduation. On introduit ensuite l'ampèremètre dans le circuit, on approche ou l'on éloigne l'aiguille, et l'on applique la formule (1).

64. Ampèremètre Richard. — Cet appareil est formé d'un électroaimant à deux branches entouré de gros fil. L'armature est composée d'une pièce en fer ayant à peu près la forme d'une hélice à deux ailes, et est mobile autour d'un axe parallèle aux branches de l'électro.

Quand le courant passe, l'armature est attirée et tourne autour de son axe. Cet effet est contre-balancé par un contrepoids ; l'hélice tourne donc jusqu'à ce que l'attraction de l'armature et le contrepoids se fassent équilibre. Les déviations sont indiquées sur un cadran par une aiguille liée à l'armature.

65. Ampèremètre Lippmann. — Nous terminerons la question des ampèremètres en décrivant l'appareil de M. Lippmann, qui est avantageusement employé lorsqu'il s'agit de mesurer en ampères des courants de pile peu intenses. Son principe est entièrement différent de ceux que nous venons d'examiner.

Il est formé d'un manomètre à mercure, placé entre les branches d'un aimant fixe de telle manière que les deux pôles A, B de l'aimant se trouvent à droite et à gauche de la branche horizontale du manomètre (fig. 23).

Le courant électrique qu'on veut mesurer est amené au mercure de cette branche horizontale et il le traverse verticalement. Le passage du courant produit une différence de niveau entre les deux branches du manomètre, différence proportionnelle à l'intensité du courant.

Voici la théorie de cet appareil. La portion de la colonne de mercure parcourue par le courant électrique représente un élément de courant qui tend à repousser l'aimant suivant une direction déterminée par la règle d'Ampère. Comme l'aimant est ici immobile et que l'élément de courant est mobile, c'est l'élément qui se déplace ; la réaction qu'il subit produit une poussée hydrostatique qui se traduit par la dénivellation du mercure. Le mercure s'arrête dès que la pression hydrostatique fait équilibre à la poussée électro-magnétique.

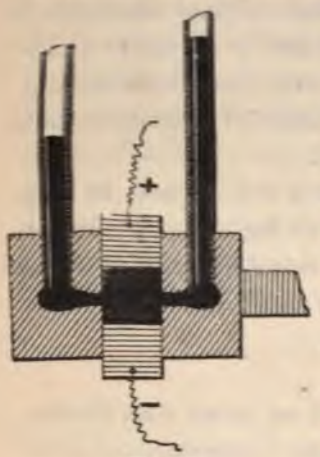


Fig. 23.

Soient i l'intensité du courant électrique, p la pression hydrostatique mesurée par la dénivellation du mercure : on peut calculer p en fonction de i. A cet effet, supposons, ce qui est le cas en réalité, que l'élément de courant ait la forme d'un parallélipipède rectangulaire dont la longueur comptée dans le sens du courant soit l.

La force électro-magnétique qui tend à déplacer l'élément du courant est égale à Hli, H étant l'intensité magnétique ; telle est l'expression de la force. Pour l'égaler à la pression hydrostatique p, il faut la diviser par l'aire de la surface sur laquelle elle s'exerce. Cette surface est celle d'une face du parallélipipède ; elle a pour dimensions la longueur l et l'épaisseur e du parallélipipède comptée dans la direction des lignes de force magnétiques. L'aire de cette surface est le. En effectuant la division, on a $p = \frac{Hi}{e}$.

La sensibilité de l'instrument va donc en augmentant avec l'intensité magnétique et avec la minceur de la lame de mercure.

En conséquence, on a armé les pôles de l'aimant (fig. 24) de deux masses de fer doux A et B, qui arrivent presque au contact l'une de l'autre et ne laissent entre elles qu'une sorte de fente où l'intensité magnétique est considérable et uniforme.

Dans cet intervalle se trouve une petite chambre à mercure rectangulaire, qui fait partie de la branche horizontale du manomètre et qui est parcourue verticalement par le courant électrique. L'épaisseur de la lamelle de mercure n'est que de 0,2 millimètre.

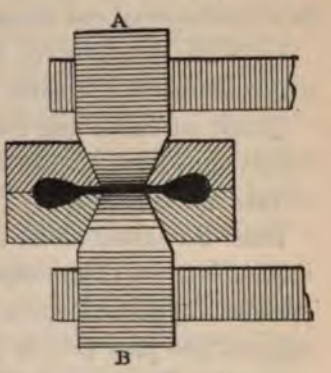


Fig. 24.

Dans le dernier modèle construit par la maison Bréguet, l'un des tubes se termine par un récipient rempli de mercure, de surface assez grande par rapport à l'autre tube pour qu'on puisse y considérer le niveau du liquide comme constant. La dénivellation se réduit alors à la hauteur dont le mercure s'est élevé dans le tube ordinaire.

66. Recommandations générales pour l'emploi des ampèremètres. — Tout ampèremètre doit être placé *directement* sur le circuit dont

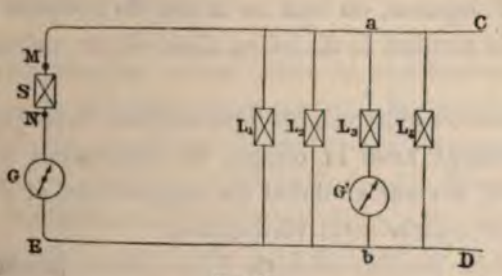


Fig. 25.

on veut mesurer l'intensité. C'est la condition essentielle de ce genre de mesures.

La figure 25 en donne un exemple. Soit un circuit SCDE, dans

lequel S représente la source d'électricité, pile ou machine, MCDEN le circuit extérieur, L_1, L_2, L_3, L_4 les appareils alimentés par le courant.

Si l'on veut connaître l'intensité totale, on met l'ampèremètre directement sur le circuit en G.

Si l'on veut connaître l'intensité du courant qui traverse un des appareils, L_3 par exemple, on met l'ampèremètre directement sur le circuit spécial qui dessert cet appareil, en G'.

Dans chaque mesure, il faut suivre les prescriptions que nous avons données à la suite de l'étude de chaque ampèremètre.

Quant au choix que l'on doit faire parmi les différents instruments que nous avons étudiés, nous pouvons nous résumer de la manière suivante :

Dans les installations industrielles où il suffit de connaître les intensités à un demi-ampère ou à un quart d'ampère près, il faut prendre l'appareil Deprez-Carpentier (§ 61). Pour les mesures qui exigent une plus grande précision, nous pouvons conseiller l'ampèremètre Thomson (§ 63). Enfin, celui de Lippmann (§ 65) convient pour les mesures des faibles intensités, quand on étudie les courants des piles, par exemple.

67. Graduation des ampèremètres. — Les galvanomètres industriels dont nous venons de parler sont tous livrés par leurs constructeurs munis de graduations qui permettent de lire directement le nombre d'ampères, ou tout au moins de l'obtenir assez vite en multipliant le nombre de divisions observé par certains coefficients connus.

Mais comme ces appareils contiennent pour la plupart des aimants qui s'affaiblissent avec le temps, ils demandent à être vérifiés assez souvent, surtout au début de leur service, et il est utile que chacun puisse opérer cette vérification.

1° Un premier procédé consiste à faire passer pendant un temps t un courant dans un électrolyte et dans le galvanomètre, en maintenant la déviation constante.

Le poids de métal déposé dans l'électrolyte permet (comme nous le verrons plus tard) de déterminer la quantité d'électricité Q qui a traversé le circuit.

L'intensité est alors donnée par la relation

$$I = \frac{Q}{t}.$$

On opère dans ce cas sur de l'azotate d'argent ou du sulfate de cuivre, avec des électrodes de même métal. L'expérience est plus commode avec le cuivre, mais l'argent donne une plus grande exactitude.

D'après les recherches de M. Gray, professeur à l'Université de Glasgow, la cathode doit être constituée par deux plaques disposées de chaque côté et à égale distance d'une autre lame un peu plus petite, formant l'anode. Avec une solution d'azotate d'argent à 5 p. 100, ou une solution de sulfate de cuivre de densité comprise entre 1,10 et 1,15, la surface de la cathode doit être calculée de façon que la densité du courant ne dépasse pas 5 milliampères dans le premier cas et 20 milliampères dans le second cas par centimètre carré. Il faut avoir soin que la solution contienne une petite quantité d'acide libre qui empêche l'oxydation du métal déposé. Les électrodes doivent être très bien nettoyées avant d'être plongées dans le bain.

2° Si l'on possède un galvanomètre étalonné dont on soit absolument sûr, on peut vérifier les autres appareils par comparaison.

3° Il existe enfin une troisième méthode plus pratique que les précédentes, mais elle exige certains appareils dont nous allons donner rapidement la description.

68. Boîtes de résistances. — Les boîtes de résistances se composent de bobines de diverses résistances, analogues comme construction à celles que nous avons décrites pour les shunts (§ 59) et qui se trouvent représentées dans la figure 17. Elles sont faites avec du fil de maillechort dont la composition suivante a été indiquée par Regnault : cuivre, 50 p. 100; zinc 30 p. 100; nickel, 20 p. 100. Ce fil est recouvert d'une double couche de soie, et sa grosseur varie suivant la résistance que l'on veut obtenir. La bobine une fois terminée est noyée dans la paraffine qui garantit l'isolement et empêche l'action perturbatrice de l'humidité.

Ces bobines sont ensuite placées les unes à côté des autres dans

une caisse en bois, sur le couvercle de laquelle sont disposés des blocs rectangulaires de laiton séparés par un intervalle de 1 millimètre environ. La disposition est la même que celle indiquée pour les shunts. L'enlèvement d'une cheville produit donc l'introduction dans le circuit de la résistance indiquée à côté de l'entaille où elle était placée.

La disposition, le nombre et la valeur des bobines peuvent varier à l'infini. Celles qui sont le plus souvent employées ont des résistances de :

1 — 2 — 4 — 5 — 10 — 20 — 50 — 100 — 200 — 500 — 1000 — 2000 ohms.

69. Clef d'inversion. — La clef d'inversion a pour but de permettre de changer à volonté le sens du courant dans une portion de circuit électrique.

Elle se compose de quatre secteurs de cuivre (fig. 26), isolés les

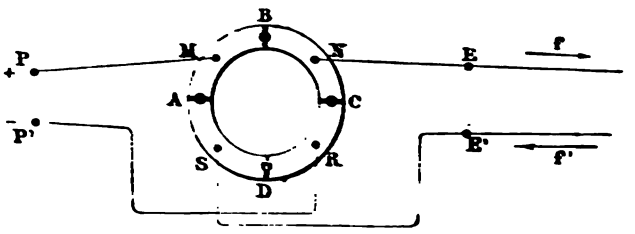


Fig. 26.

uns des autres et munis à leurs extrémités d'entailles A, B, C, D, dans lesquelles on peut enfoncer des chevilles métalliques qui mettent les secteurs en communication. Ces secteurs portent chacun une borne.

On relie les pôles P, P' de la pile à deux bornes M, R diamétralement opposées, et les deux extrémités E, E' du circuit aux autres bornes N, S. Dans ces conditions, on voit sur la figure que, si l'on met les chevilles en B et D, le courant aura dans le circuit extérieur le sens indiqué par les flèches *f*, *f'*. Au contraire, il ira en sens opposé si l'on place les chevilles dans les entailles A et C.

L'appareil permet donc d'envoyer le courant dans une direction ou dans une autre, suivant les besoins.

70. Graduation des ampèremètres par la méthode de la résistance. — Cette méthode qui, comme nous l'avons dit, est plus commode que celles indiquées ci-dessus, consiste à prendre un galvanomètre à réflexion, celui de Deprez-d'Arsonval (§ 56), par exemple, et à l'étalonner de manière à lui faire donner 50 divisions par volt de chaque côté du zéro de l'échelle.

Pour cela, on monte le galvanomètre G en circuit, comme

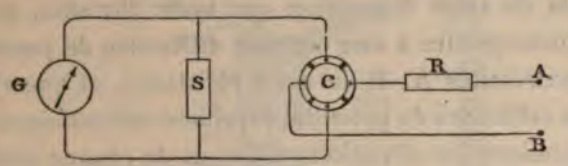


Fig. 27.

l'indique la figure 27, avec un shunt S, une clef d'inversion C, une boîte de résistance R; puis on complète le circuit en plaçant entre A et B une pile étalon dont on connaît parfaitement la force électromotrice. Supposons, par exemple, qu'on prenne une pile du modèle du Post Office dont la force électromotrice est de 1,07 volt.

On débouche alors des résistances dans le shunt et dans la boîte, 8 000 à 9 000 ohms en R et 1 ohm dans le shunt; puis on augmente la résistance du shunt de manière à obtenir, en envoyant

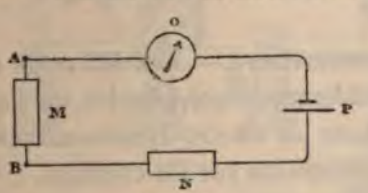


Fig. 28.

successivement le courant dans les deux sens au moyen de la clef d'inversion, deux déviations, l'une à droite du zéro, l'autre à gauche, dont la somme soit de 107 divisions de l'échelle. (Si l'on se sert d'une autre pile étalon de force électromotrice égale à $\frac{n}{100}$ de volt, on cherchera à avoir deux déviations dont la somme soit de n divisions.) Dans le cas que nous considérons, il est évident qu'une division de l'échelle représentera 0,01 volt.

Ceci fait, on dispose en circuit (fig. 28) une source P d'électri-

cité aussi constante que possible, un accumulateur, par exemple, l'ampèremètre à graduer O, une résistance fixe et connue M (on emploie ordinairement une résistance de 0,1 ohm), et une boîte de résistances N dont le seul but est de faire varier l'intensité du courant. Le galvanomètre préalablement étalonné est monté sur ce nouveau circuit de telle manière que les deux points A, B de la figure 27 correspondent aux extrémités de la résistance connue.

Il résulte de cette disposition que toute déviation du galvanomètre G correspondra à une certaine différence de potentiel entre les deux extrémités A, B de cette résistance, et que l'on pourra avoir cette différence de potentiel exprimée en centièmes de volt en faisant la somme des déviations obtenues de chaque côté du zéro.

La résistance étant connue, la loi de Ohm donnera l'intensité du courant qui traverse M et par suite l'ampèremètre à graduer.

On vérifie toute la graduation de cet ampèremètre en faisant varier la résistance N.

On pourrait simplifier l'expérience en ne faisant qu'une lecture d'un seul côté du zéro et en réglant le shunt S du galvanomètre G de façon que la déviation soit de 107 divisions. Mais la double lecture donne des résultats plus exacts et compense une erreur due au déplacement possible du zéro, si le fil du galvanomètre a subi une torsion au moment de son réglage.

71. Electro-dynamomètres. — Les différents appareils que nous avons étudiés précédemment sont fondés sur l'action d'un courant sur un aimant. Dans les électro-dynamomètres, au contraire, on utilise l'action des courants sur les courants.

Un électro-dynamomètre se compose en principe d'un conducteur fixe et d'un conducteur mobile, traversés, celui-ci par le courant à mesurer, celui-là par un courant constant. La déviation obtenue est proportionnelle au produit des intensités de ces deux courants, ce qui permet de calculer celle que l'on cherche.

La sensibilité de l'appareil a été augmentée par un artifice qui consiste à faire passer dans les deux conducteurs le courant que l'on veut mesurer, et par suite à faire agir ce courant sur lui-même. *Les déviations sont alors proportionnelles au carré de l'intensité.*

Tel a été le principe du premier électro-dynamomètre construit par Weber.

Contrairement à ce qui se passe avec les ampèremètres décrits

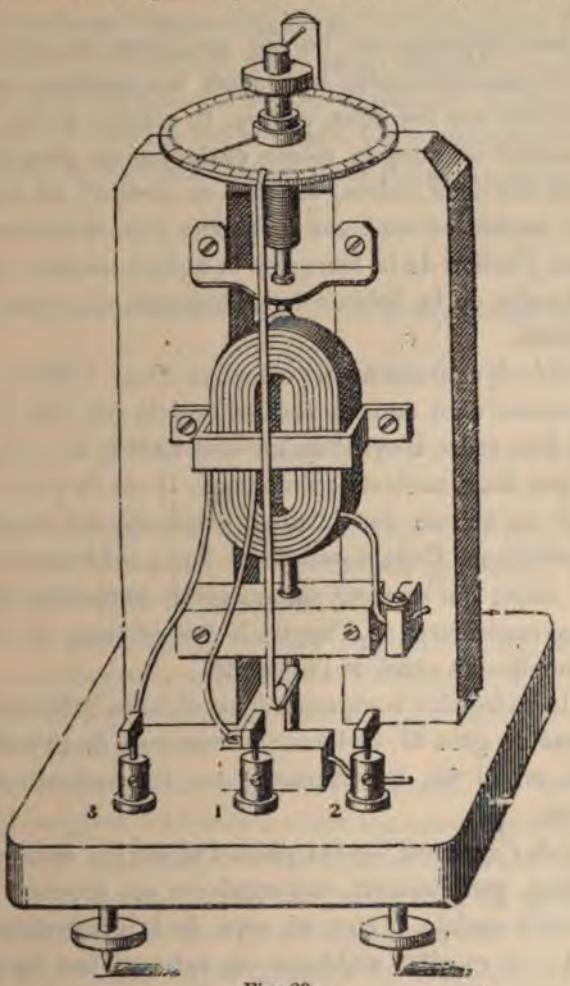


Fig. 29.

plus haut, les électro-dynamomètres peuvent servir à la mesure des courants alternatifs; en effet, lorsque le courant change de sens, il le fait à la fois dans les deux conducteurs; l'action réciproque de ces derniers reste par suite la même, et le cadre mobile subit une déviation comme dans le cas des courants continus.

Electro-dynamomètre de Siemens. — MM. Siemens et Halske

ont modifié l'appareil de Weber de façon à annuler l'action de la terre sur le cadre mobile; ils l'ont aussi rendu propre aux applications industrielles, en le construisant pour la mesure des fortes intensités.

Ils se sont appuyés sur ce fait que, pour un courant donné, l'action est proportionnelle au produit des nombres de tours que le courant fait sur les deux cadres. Il résulte de là qu'avec un même courant on aura la même déviation en plaçant dix tours sur chacun des deux cadres, ou bien en mettant un seul tour sur la bobine mobile et cent sur la bobine fixe. Seulement, dans le second cas, l'action de la terre sur la bobine mobile est nulle par rapport à celle de la bobine fixe; l'appareil n'a donc pas besoin d'être orienté.

Cet électro-dynamomètre se compose d'une bobine fixe placée dans l'intérieur d'un anneau vertical mobile (fig. 29); ce dernier est formé d'un cadre n'ayant qu'un seul tour de fil et est mis dans le circuit par deux contacts en mercure. Il est de plus suspendu à un ressort en spirale dont l'autre extrémité est attachée à une douille métallique. Cette douille, que l'on peut tourner à la main, porte un index qui se meut sur un cercle horizontal divisé placé à la partie supérieure de l'appareil. Les torsions du ressort sont proportionnelles au carré de l'intensité.

Enfin, le cadre fixe comprend deux circuits différents : le premier, formé de gros fil, sert pour les courants de 10 à 60 ampères; le second, en fil fin, est employé pour les courants inférieurs à 10 ampères.

Emploi de l'appareil. — On place d'abord les deux cadres dans une position parfaitement rectangulaire en amenant un index fixé au cadre mobile à être au zéro de la graduation du cercle horizontal; ce résultat s'obtient en agissant sur la douille qui porte le ressort. On note alors la position de l'index fixé à cette douille.

Cela fait, on envoie le courant dans l'électro-dynamomètre, en prenant celui des deux circuits du cadre fixe qui correspond à l'intensité que l'on veut mesurer. Le cadre mobile subit une déviation; on le ramène à sa position rectangulaire en augmentant la tension du ressort et en faisant tourner la douille. L'angle que

décrit l'index de cette douille indique, à l'aide d'une table, le nombre d'ampères du courant.

72. Décompositions électro-chimiques. — L'intensité d'un courant peut encore être obtenue d'une façon indirecte en mesurant, comme nous l'indiquons ci-dessous, la quantité d'électricité qui traverse le circuit dans un temps donné. Cette quantité d'électricité une fois connue, il suffit de la diviser par le temps d'après la formule

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Mais ceci suppose naturellement le cas d'un courant d'intensité constante.

MESURE DE LA QUANTITÉ

73. — Dans la plupart des cas, la quantité d'électricité se déduit de l'intensité par la formule du paragraphe précédent. On peut cependant la déterminer directement.

Pour cela, on place sur le passage du courant une dissolution qui se trouve décomposée comme nous l'avons vu (§ 16).

Le poids de matière électrolysée permet de déterminer la quantité d'électricité mise en jeu.

En effet, reportons-nous à la loi de Faraday : « Si dans un même circuit on place à la suite les uns des autres divers appareils de décomposition contenant des électrolytes différents, les quantités de ces divers électrolytes décomposées dans un même temps sont proportionnelles à leurs équivalents chimiques. »

Or, les expériences les plus récentes ont démontré que 1 coulomb d'électricité traversant un électrolyte met en liberté

0,010384 milligramme d'hydrogène.

Si donc nous appelons E l'équivalent chimique d'un corps rapporté à l'hydrogène, le poids de ce corps mis en liberté par 1 coulomb sera

$$m = 0{,}010384 \times E \text{ milligrammes.}$$

D'après la loi de Faraday, ce poids m est constant pour un corps donné. C'est ce qu'on appelle l'*équivalent électro-chimique*.

Ce poids m étant mis en liberté par 1 coulomb, le nombre Q de coulombs nécessaires pour décomposer un poids P sera donné par la formule

$$P = 0{,}010384 \times E \times Q;$$

d'où

$$Q = \frac{P}{0{,}010384 \times E}.$$

Q étant exprimé en coulombs et P en milligrammes.

La formule précédente permet de déterminer la quantité d'électricité qui traverse un circuit, toutes les fois que dans ce trajet le courant opère une décomposition électro-chimique.

Dans l'industrie, on demande souvent le nombre d'ampères-heure N qui ont traversé le circuit.

Comme un ampère-heure vaut 3 600 coulombs, il s'ensuit que

$$N = Q \times \frac{1}{3\,600},$$

ou

$$N = \frac{P}{3\,600 \times 0{,}010384 \times E}.$$

Nous donnons à la fin de cet ouvrage un tableau indiquant les valeurs des équivalents électro-chimiques des principaux corps.

74. — Le premier appareil employé a été le *voltamètre* dans lequel on décompose l'eau. Il convient en ce cas de mesurer l'hydrogène dégagé plutôt que l'oxygène, en raison de son plus grand volume et de sa moindre solubilité. En outre, il faut maintenir la température au moins à 20°; à des températures plus basses, une partie de l'oxygène naissant s'unit à l'eau qui environne l'électrode positive et forme du bioxyde d'hydrogène qui, arrivant peu à peu jusqu'à l'électrode négative, absorbe une partie de l'hydrogène dégagé pour reformer de l'eau.

Pour ces différentes raisons, le voltamètre est un appareil peu exact. Aussi n'est-il jamais employé; nous n'en parlons que pour mémoire.

On préfère en général opérer l'électrolyse d'un sel métallique, et l'on pèse le métal déposé sur l'électrode négative. On a intérêt à prendre un sel dont le métal ait peu d'affinité pour l'oxygène, afin d'éviter les actions secondaires qui pourraient se produire. Il est bon aussi que le métal ait un équivalent chimique élevé, afin que le poids déposé soit plus fort. Le sulfate de cuivre, le sulfate de zinc et l'azotate d'argent remplissent ces conditions.

Enfin, la composition de la liqueur doit autant que possible rester la même pendant la durée de l'expérience. On arrive à ce résultat en mettant un excès de sel qui se dissout au fur et à mesure de la décomposition.

Il est encore plus pratique de prendre comme électrodes des plaques du métal qui compose la dissolution (du cuivre, par exemple, si celle-ci est du sulfate de cuivre). En effet, il se dissout alors autant de métal du côté de l'électrode positive qu'il s'en dépose sur l'électrode négative. Par ce moyen, il ne se produit aucune action secondaire et le bain ne change pas de composition. Dans ce cas, l'électrode est dite *soluble*.

Emploi de l'appareil. — On place dans la dissolution métallique bien saturée deux électrodes en platine dont l'une, celle qui est reliée au pôle négatif, a été soigneusement pesée. Après un temps suffisant, on pèse de nouveau cette électrode, et l'augmentation de poids en milligrammes est portée dans la formule donnée plus haut.

Comme nous venons de le dire, il est préférable de prendre une électrode soluble. Le poids P est donné par l'accroissement de poids de l'électrode négative, ou par la diminution de poids de l'autre, ou mieux encore par la moyenne de ces deux quantités.

Lorsque les courants électriques sont très énergiques, on peut n'envoyer dans le bain électrolytique qu'une partie déterminée du courant. On établit ce bain en dérivation et on calcule la quantité d'électricité cherchée au moyen de la formule des dérivations.

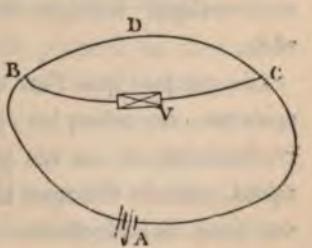


Fig. 30.

Soit le circuit ABC (fig 30), dans lequel le bain V est mis en

dérivation. Soient R_1 la résistance du bain et R_2 celle du circuit BDC. Soient q_1 la quantité d'électricité mesurée en V, q_2 celle qui passe en D, et Q la quantité totale cherchée.

Les quantités d'électricité étant inversement proportionnelles aux résistances, nous avons

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

ou

$$\frac{q_1 + q_2}{q_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2};$$

or

$$q_1 + q_2 = Q$$

donc

$$Q = \frac{R_1 + R_2}{R_2} q_1.$$

75. Compteur d'électricité Edison. — Le compteur Edison, employé en Amérique pour mesurer les quantités d'électricité consommées par les abonnés des stations d'éclairage, repose sur les principes précédents ; il comprend deux voltamètres hermétiquement bouchés renfermant une dissolution de sulfate de zinc ; les électrodes sont en zinc.

Ces deux voltamètres sont traversés par le centième ou même le millième du courant total ; l'un donne les mesures périodiques ordinaires ; l'autre sert simplement de contrôle au premier.

Une lampe à incandescence est placée au-dessous de ces voltamètres ; elle est destinée à empêcher le refroidissement des liquides qui pourrait diminuer la décomposition et fausser les mesures. Cette lampe est mise en circuit par un commutateur automatique lorsque la température s'abaisse aux environs de zéro.

Chaque fois que l'on veut mesurer la quantité d'électricité consommée, on retire les électrodes des vases dans lesquels elles sont renfermées et on les pèse. On les remet ensuite en place, en ayant soin de changer leur signe. De cette façon, le zinc déposé sur l'une des électrodes se redissout et le dépôt s'opère sur l'autre. Grâce à cette précaution, les deux mêmes plaques peuvent resservir indéfiniment.

L'appareil a d'ailleurs été modifié par Edison de telle sorte qu'on

n'ait plus besoin d'enlever les électrodes et de les peser chaque fois. Elles sont alors placées aux extrémités d'un fléau qui s'incline dans un sens ou dans l'autre suivant le poids du métal déposé. Dès que ce fléau bascule, les communications électriques changent ainsi que le sens du courant, l'électrode positive devient négative et vice versa.

On connaît d'ailleurs le poids du dépôt métallique nécessaire pour faire basculer le fléau, et par suite la quantité d'électricité correspondante. Il suffit alors, pour savoir la quantité d'électricité consommée, de compter le nombre de fois que le renversement du courant s'est produit. Ce nombre est enregistré par un compteur mécanique.

Ces appareils présentent plusieurs inconvénients qui résultent de leur principe même. Parmi les principaux, nous pouvons citer l'évaporation du liquide, son changement de résistance, les difficultés qu'offre la pesée des électrodes, etc. De plus, vu sa grande résistance, il est impossible de placer l'appareil dans le circuit électrique; on le met en dérivation et il n'est traversé que par une très faible partie du courant, de telle sorte que les erreurs de mesure sont multipliées par un coefficient assez élevé et que le résultat peut être fort éloigné de la vérité. Enfin il n'est pas applicable avec des courants alternatifs.

76. Compteur Aron. — Le principe du compteur Aron repose sur les propriétés du pendule. On sait que, pour un même pendule, la durée d'oscillation varie en raison inverse du carré de la force verticale qu'il supporte (en temps normal cette force est la pesanteur). Si donc on fait osciller au-dessus d'une bobine traversée par un courant électrique un pendule portant un aimant à son extrémité, l'action attractive ou répulsive développée entre l'aimant et la bobine s'ajoutera à l'effet de la pesanteur ou s'en retranchera, et diminuera ou augmentera la durée d'oscillation.

On peut même, en calculant convenablement l'aimant et la bobine, obtenir des variations de la durée d'oscillation proportionnelles aux variations de l'intensité du courant dans la bobine. Si alors on prend deux pendules de même longueur, mais terminés, l'un par une lentille ordinaire en laiton et l'autre par un

aimant, ce dernier oscillera plus vite que l'autre pendant le passage du courant électrique, et leur différence de marche pourra donner la mesure de la quantité d'électricité qui aura traversé la bobine.

Tel est le principe de l'appareil. Il suffirait, pour opérer une

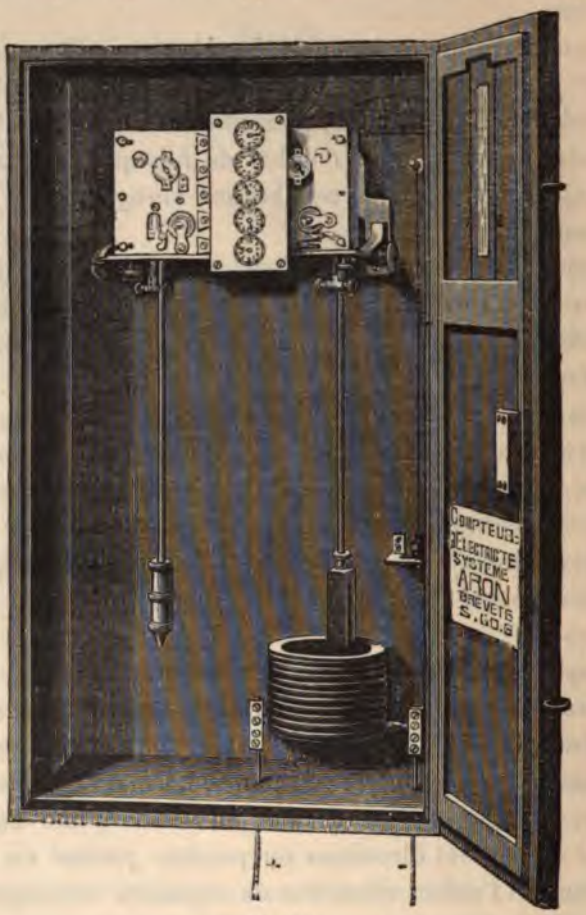


Fig. 31.

mesure, de faire actionner une horloge par chacun des deux pendules et de lire la différence d'heures indiquée ; mais le compteur renferme un engrenage différentiel dans le détail duquel nous n'avons pas à entrer, et grâce auquel la différence de marche des pendules apparaît seule sur les cadrans.

La figure 31 représente le compteur Aron tel qu'il est employé en Allemagne où il est fort répandu.

MESURE DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

77. — Les méthodes employées pour mesurer la différence de potentiel entre deux points quelconques d'un circuit électrique sont fort nombreuses. Elles sont applicables au cas particulier où les deux points en question sont les deux pôles mêmes d'une pile : on a alors la différence de potentiel aux bornes de la pile[1]. Les principes sur lesquels elles sont basées sont différents, et par suite aussi les appareils dont elles indiquent l'emploi, c'est-à-dire les électromètres, les condensateurs et les voltmètres. Le cadre de notre ouvrage ne nous permet pas de décrire tous ces appareils, et nous parlerons seulement de ceux qui sont susceptibles d'être utilisés dans la pratique et pour les applications industrielles.

Les électromètres ne rentrent pas en général dans cette catégorie : ils donnent des indications fort exactes, trop exactes même au point de vue industriel, si l'on peut employer cette expression qu'il est d'ailleurs facile d'expliquer. Les piles, en effet, se

[1] La différence de potentiel aux bornes d'une pile est un élément particulier qu'il ne faut pas confondre avec la force électromotrice.

Il se passe en effet dans une pile deux phénomènes opposés : l'un par lequel elle produit la force, l'autre par lequel elle absorbe une partie de cette force en raison de la résistance que ses plaques métalliques et son liquide opposent au passage du courant, et à laquelle on a donné le nom de *résistance intérieure*.

C'est d'ailleurs une condition commune à toutes les machines; elles absorbent toujours une partie de la force qu'elles produisent, par suite des résistances passives qui résultent du fonctionnement même de leurs organes. Dans une machine à vapeur, par exemple, il y a le frottement de la vapeur dans les tuyaux, le frottement du piston dans le cylindre, etc., que l'on ne peut éviter. Un phénomène analogue se présente dans la pile, qui diminue d'autant l'énergie disponible pour le circuit extérieur.

La force électromotrice d'une pile est donc toujours supérieure à la différence de potentiel de ses pôles; la relation qui existe entre ces deux éléments est d'ailleurs fort simple. Si E est la force électromotrice, e la différence de potentiel aux pôles, i l'intensité, r la résistance intérieure de la pile, on a :

$$E = e + ir;$$

e représente alors l'énergie disponible dans le circuit extérieur, et ir l'énergie absorbée en pure perte à l'intérieur de la pile. Nous reviendrons sur cette question dans le chapitre consacré à l'étude de la pile.

polarisent par leur fonctionnement, c'est-à-dire que, sous l'influence d'actions chimiques secondaires, leur force électromotrice diminue. Or, c'est cette force électromotrice diminuée, celle en somme dont on dispose, qu'il est utile de connaître dans l'industrie. Les électromètres ne la donnent pas et mesurent, au contraire, la force électromotrice indépendamment de ces actions secondaires ; ils permettent de déterminer des valeurs théoriques, dont l'exactitude est parfaite mais qui ne peuvent servir dans la pratique. Ce sont de plus des instruments très fragiles, exigeant une installation spéciale, et leur emploi est fort délicat. Aussi, ne sont-ils guère susceptibles d'êtres employés que dans les cabinets de physique ; nous ne les examinerons donc pas.

78. Voltmètre électro-statique de sir William Thomson. — Nous ferons toutefois une exception pour un appareil de cette classe imaginé par sir William Thomson et désigné sous le nom de voltmètre électro-statique. La simplicité de sa construction et de son emploi en fait un instrument réellement industriel.

Il se compose de deux systèmes de plaques, dont l'un est fixe, et dont l'autre peut être animé d'un mouvement de rotation autour de son axe qui est horizontal (fig. 32). Le premier est formé de deux plaques en laiton A, B, disposées parallèlement l'une à l'autre, qui sont reliées par des tiges métalliques et isolées de la cage de l'instrument. La plaque mobile C, en aluminium, est placée entre elles et se meut dans un plan vertical parallèle aux deux plaques fixes. Une aiguille sert d'indicateur et se déplace sur le cadran.

Sur les faces latérales de la cage se trouvent deux paires de bornes qui en sont soigneusement isolées ; les bornes de chaque paire communiquent l'une avec l'autre, celles de droite directement, celles de gauche par le moyen d'un fil de cuivre fin placé dans un tube de verre en V ; ce fil offre une très grande résistance et sert en quelque sorte de tube de sûreté. Les deux bornes postérieures sont reliées, l'une T aux deux plaques fixes A, B, l'autre non vue sur la figure, à la plaque mobile C. Les deux bornes antérieures, dont celle de gauche est représentée en T', servent à fixer les conducteurs.

Il résulte de là que les deux systèmes de plaques prennent res-

pectivement les potentiels des points avec lesquels ils communiquent ; la plaque mobile se trouve attirée ; en vertu des lois de l'électricité statique, la force qui la fait mouvoir est proportionnelle au carré de la différence de potentiel des plaques et, par suite, des deux points étudiés.

Cette force d'attraction est compensée par l'action d'un poids

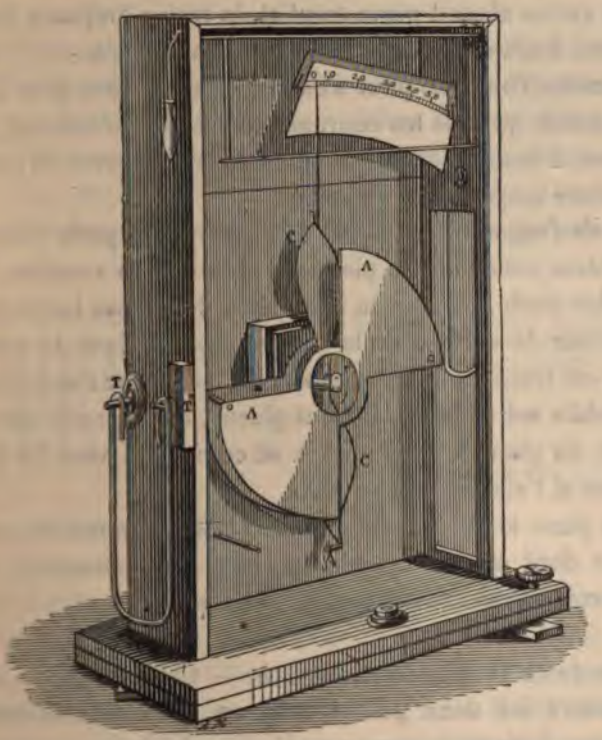


Fig. 32.

suspendu sur une lame de couteau fixée à la partie inférieure de la plaque mobile. Le déplacement permet donc de mesurer la différence de potentiel cherchée.

L'échelle est graduée empiriquement de 0 à 60, de manière que les divisions représentent des différences de potentiel égales ; la valeur absolue de chaque degré de l'échelle dépend du poids employé. Chaque appareil est muni d'une série de poids de 32,5, de 97,5, et de 390 milligrammes pour trois séries de mesures dans le rapport de 1, 2, 4. Une division de l'échelle représente 50 volts

avec le premier poids, 100 volts avec le second et 200 volts avec le troisième.

L'appareil est, par suite, destiné aux mesures de différences de potentiel très élevées ; il donne jusqu'à 10 000 volts, ce qui est plus que suffisant, les courants dont on se sert actuellement atteignant rarement cette tension. Il présente le grand avantage de ne renfermer aucun aimant permanent et de rester toujours identique à lui-même ; il n'a donc pas besoin de réétalonnage.

Le voltmètre Thomson peut s'employer aussi bien avec les courants alternatifs qu'avec les courants continus ; seulement, dans le premier cas, il donne non pas le carré de la différence de potentiel, mais la valeur moyenne de ce carré.

Emploi de l'appareil. — Après avoir ouvert la porte vitrée de la cage, on place avec soin la plaque mobile sur le couteau. Il faut bien prendre garde, dans cette opération, de ne pas la tordre ou la déformer. Sur la surface de la plaque mobile, dans le sens de la longueur, est tracée une ligne droite qui passe par l'axe. Quand la plaque mobile est convenablement placée, on aperçoit cette ligne en arrière du plan de la plaque A et coïncidant avec le bord de cette plaque si l'aiguille est au zéro.

Puis on place le poids correspondant à la différence de potentiel à mesurer dont on a toujours une idée approximative, et l'on met l'appareil en dérivation sur les deux points.

79. Méthode de la grande résistance. — Cette méthode consiste à établir entre les deux points dont on cherche la différence de potentiel une dérivation comprenant une résistance connue assez considérable, et à mesurer l'intensité du courant au moyen d'un ampèremètre étalonné. La différence de potentiel est donnée par la loi de Ohm,

$$E = IR.$$

Ce procédé est assez simple ; il est cependant peu appliqué, car pour les différences de potentiel peu élevées, il est plus pratique et plus exact d'avoir directement recours à un des voltmètres étalonnés que nous verrons plus loin. La méthode de la grande résistance ne peut servir que lorsque la différence de potentiel dépasse

les limites des voltmètres industriels et qu'on ne possède pas l'appareil de Thomson étudié ci-dessus. Encore exige-t-elle dans ce cas d'assez grandes précautions, afin d'empêcher l'échauffement des bobines de résistances; leur isolement diminue en effet très vite à mesure que leur température s'élève, et les indications peuvent se trouver faussées de ce fait.

80. Condensateurs. — Un des procédés qui donnent la différence de potentiel repose sur l'emploi d'un appareil appelé *condensateur*, dont nous n'avons pas encore parlé. Nous n'avons pas à en développer ici la théorie; nous allons simplement en décrire la construction et le mode de fonctionnement.

Un condensateur (fig. 33) n'est pas autre chose qu'une bouteille

Fig. 33.

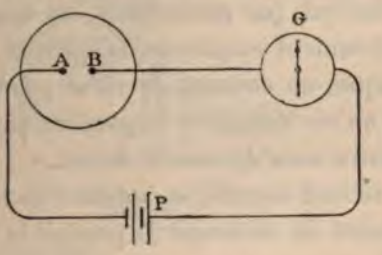


Fig. 34.

de Leyde à grande surface sous un petit volume. Il se compose de feuilles métalliques très minces, généralement en étain, placées les unes sur les autres et séparées par d'autres feuilles en matière isolante, gutta-percha, papier paraffiné ou mica. Les feuilles métalliques sont réunies de deux en deux, c'est-à-dire que les feuilles de rang impair communiquent toutes entre elles, ainsi que les feuilles de rang pair, de manière à constituer l'armature intérieure et l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde. Le verre de cette bouteille est ici remplacé par la matière isolante.

Cette disposition permet de réduire le volume du condensateur, tout en lui donnant une grande capacité. C'est ainsi qu'un condensateur d'un microfarad contient environ 300 feuilles d'étain circulaires séparées par les feuilles de mica, et tient dans une boîte cylindrique de 8 centimètres de hauteur et de 16 centimètres de diamètre.

Manière d'opérer. — Voici comment ce condensateur fonctionne. Supposons que nous mettions ses deux armatures A, B (fig. 34) en communication avec les pôles d'une pile P, et que nous intercalions un galvanomètre G dans le circuit. Il se produit aussitôt un courant électrique, comme l'indique la déviation de l'aiguille aimantée ; mais ce courant ne dure qu'un instant, et l'aiguille revient aussitôt au zéro de la graduation. Ce courant est dû à la différence de potentiel qui existe au début entre les pôles de la pile et les armatures du condensateur, et il cesse parce que chacune de ces armatures a pris le potentiel du pôle auquel elle est réunie. On l'appelle courant de *charge* du condensateur.

Supprimons maintenant la pile et fermons le circuit en P. Les deux armatures se trouvent avoir entre elles une différence de potentiel qui, par parenthèse, est égale à celle des pôles de la pile précédemment employée. D'après la définition même du courant électrique, un courant devra se produire ; mais il ne durera, lui aussi, qu'un instant et disparaîtra parce que le potentiel des deux armatures sera devenu le même.

Ce second courant se constate encore sur le galvanomètre ; c'est le courant de *décharge*. Il produit la même déviation que le courant de charge et lui est égal ; il est naturellement dirigé en sens contraire.

La loi de Ohm s'applique à ces courants, tout comme aux courants continus, dont ils ne diffèrent d'ailleurs que par la durée.

Appliquons la formule du § 13 qui relie la charge, la capacité et le potentiel.

La charge Q d'une des armatures, c'est-à-dire la quantité d'électricité que cette armature a reçue pendant sa communication avec le pôle de la pile, est donnée par :

$$Q = CE,$$

E étant le potentiel de ce pôle et C la capacité du condensateur. En d'autres termes, pour un même condensateur, la charge est proportionnelle à la différence de potentiel des pôles de la pile. On conçoit donc que, pour mesurer cette différence de potentiel, il suffise de déterminer la quantité d'électricité que contient le condensateur. Cette détermination se fait à l'aide d'un galvanomètre

en prenant pour mesure de la quantité d'électricité l'impulsion produite sur l'aiguille aimantée, impulsion qui lui est sensiblement proportionnelle.

Emploi du condensateur. — Supposons que nous voulions employer un condensateur. Il faudra d'abord le charger avec une pile, puis le décharger sur un circuit qui comprendra un galvanomètre.

L'expérience se montera donc en reliant une des armatures à un des pôles de la pile et à une des bornes du galvanomètre, puis en faisant communiquer successivement l'autre armature avec le second pôle de la pile et la seconde borne du galvanomètre.

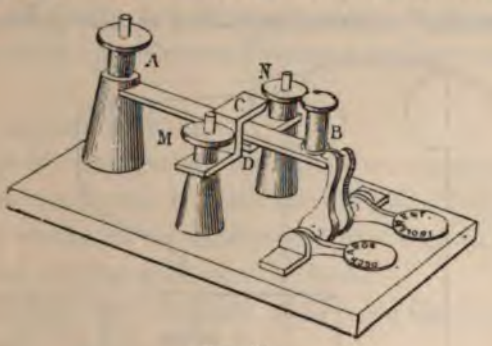


Fig. 35.

81. Clef de décharge. — Pour pouvoir effectuer commodément ces deux communications successives, il est nécessaire d'employer une clef particulière, appelée *clef de décharge*. Il existe plusieurs formes différentes de cet instrument ; en voici une assez simple et pratique.

Cette clef consiste en un levier AB (fig. 35), monté sur un pivot à son extrémité A et mobile entre deux contacts C et D reliés à deux bornes M, N. Deux touches, placées près de l'autre extrémité B et marquées « Décharge » et « Isolement », sont reliées à deux crochets en ébonite contre lesquels vient buter le levier. La hauteur du crochet correspondant à la touche « Décharge » est un peu plus grande que celle de l'autre crochet.

Les communications sont établies de la façon suivante : le levier est relié par la borne A à l'armature du condensateur ; le fil du pôle de la pile aboutit à la borne N du contact inférieur D, et le fil du galvanomètre à la borne M du contact supérieur C.

Voici le fonctionnement de la clef. Lorsqu'on veut charger le condensateur, on appuie en B sur le levier jusqu'à ce qu'il soit retenu par le crochet inférieur. A ce moment, le levier touche le contact inférieur et l'armature communique avec le pôle de la pile.

On appuie alors sur la touche « Isolement » ; le crochet inférieur lâche le levier qui vient buter contre le crochet supérieur. Dans cette position, le levier ne communique avec aucun des contacts, l'armature est isolée.

Enfin, on appuie sur la touche « Décharge ». Le levier est abandonné par le crochet supérieur et vient toucher le contact supérieur C. L'armature communique alors avec le galvanomètre.

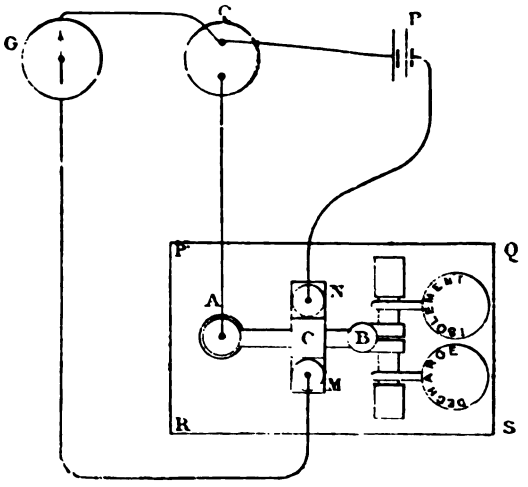


Fig. 36.

La figure 36 indique la disposition de l'expérience. PQRS clef de décharge, G galvanomètre, C condensateur, P pile.

82. Méthode de Law. — Ces considérations préliminaires exposées, nous pouvons décrire la méthode de Law pour la mesure des différences de potentiel.

Elle consiste à charger et à décharger successivement un même condensateur, en le faisant communiquer d'abord avec les pôles d'une pile qui sert d'étalon, puis avec les deux points dont on cherche la différence de potentiel. Le quotient des quantités d'électricité mises en jeu dans les deux décharges donne la valeur

de cette différence de potentiel par rapport à la force électromotrice de la pile étalon.

Si les déviations du galvanomètre étaient exactement proportionnelles aux intensités et, par suite, à ces quantités d'électricité, il suffirait de prendre le rapport des déviations. Mais cette proportionnalité n'est pas rigoureuse, et il est préférable d'amener la déviation à être la même dans les deux décharges. On arrive à ce résultat en shuntant le galvanomètre et en faisant varier la résistance du shunt.

Emploi de la méthode. — Après avoir chargé le condensateur avec la pile, on le décharge sur le galvanomètre de résistance G, qui doit être du système à réflexion Thomson, avec un shunt de résistance S_1.

On note la déviation obtenue.

On recharge le condensateur en reliant ses armatures aux deux points dont on recherche la différence de potentiel ; puis on le décharge de nouveau, et on ramène la déviation à la même valeur en prenant une résistance S_2 pour le shunt.

Soient V la différence cherchée, E la force électromotrice de la pile étalon, on a

$$\frac{V}{E} = \frac{\dfrac{G + S_2}{S_2}}{\dfrac{G + S_1}{S_1}}. \qquad (1)$$

En effet, dans le cas de la pile étalon, la quantité d'électricité mise en mouvement se dérive sur le galvanomètre et sur son shunt en raison inverse des résistances. Soient I_g et I_s celles qui passent dans le galvanomètre et dans le shunt, et I_t la quantité totale ;

$$\frac{I_s}{I_g} = \frac{G}{S_1}.$$

d'où en remplaçant chaque numérateur par la somme des deux termes de la fraction,

$$\frac{I_t}{I_g} = \frac{G + S_1}{S_1}.$$

Nous arrivons de même dans la seconde expérience à

$$\frac{I'_t}{I'_g} = \frac{G + S_2}{S_2}.$$

Divisons membre à membre et supprimons de part et d'autre I_g et I'_g qui sont égales puisque la déviation est la même dans les deux expériences.

$$\frac{I'_1}{I_1} = \frac{\frac{G + S_2}{S_2}}{\frac{G + S_1}{S_1}}.$$

Comme

$$\frac{I'_1}{I_1} = \frac{V}{E}$$

nous obtenons finalement la formule (1).

Exemple. — Avec une force électromotrice E, la déviation est de 300 divisions sur un galvanomètre de résistance G égale à 5 000 ohms et avec un shunt S_1 de 1 000 ohms. Avec la différence de potentiel V, pour avoir la même déviation, il faut donner au shunt une résistance S_2 de 2 500 ohms. On a

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{5000 + 2500}{2500}}{\frac{5000 + 1000}{1000}} = \frac{1}{2}.$$

Nous venons de supposer que les déviations étaient exactement les mêmes dans les deux expériences. Cette précaution n'est pas tout à fait nécessaire ; il suffit qu'elles soient à peu près égales ; car, pour des valeurs suffisamment voisines, elles sont rigoureusement proportionnelles aux quantités d'électricité. On amène donc simplement les déviations à des valeurs peu différentes, et l'on rectifie les résultats obtenus en les multipliant par les déviations.

Soient d_1 et d_2 ces deux déviations

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{G + S_2}{S_2} \times d_2}{\frac{G + S_1}{S_1} \times d_1}.$$

Exemple. — Avec une force électromotrice E, la déviation est de 300 divisions sur un galvanomètre de résistance G égale à 5000 ohms et avec un shunt S_1 de 1000 ohms. Avec la différence

de potentiel V, on a une déviation de 292 divisions pour un shunt de 2 400 ohms.

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{5000 + 2400}{2400} \times 292}{\frac{5000 + 1000}{1000} \times 300} = \frac{1}{2}.$$

La méthode de Law est susceptible d'une grande exactitude et possède cet avantage de pouvoir donner la différence de potentiel de deux points qui sont déjà dans un circuit électrique, sans que l'on soit obligé d'interrompre ce circuit. Elle n'est guère applicable que dans les laboratoires.

88. Mesures par les galvanomètres étalonnés. — Ce sont les mesures les plus usitées dans les ateliers ; car elles donnent la différence de potentiel par une simple lecture. Elles reposent sur l'emploi des galvanomètres étalonnés dont voici le principe :

Soient deux points A et B (fig. 37) d'un circuit électrique dont nous cherchons la différence de potentiel. Etablissons un galvanomètre G en dérivation sur ces deux points ; l'établissement de cette dérivation modifiera le régime du circuit et notamment diminuera la résistance entre les points A et B, ainsi que la différence de potentiel de ces deux points.

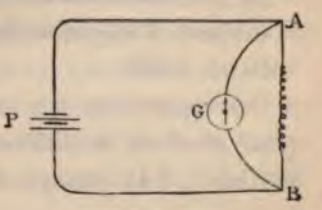


Fig. 37.

Supposons maintenant que nous augmentions la résistance de la dérivation qui renferme le galvanomètre. Le courant qui la traverse diminuera et la différence de potentiel changera moins que précédemment. Donnons à cette dérivation une résistance considérable ; elle ne sera plus traversée que par un courant assez faible pour ne pas altérer sensiblement le premier régime dans le reste du circuit. La différence de potentiel des points A, B restera donc à peu près la même.

Or, la différence de potentiel entre deux points d'un conducteur est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse ; les déviations d'un galvanomètre qui indiquent l'intensité pourront

donc aussi représenter la différence de potentiel cherchée des points A, B.

La méthode consiste alors à placer un galvanomètre de très grande résistance en dérivation sur les deux points en question. La déviation du galvanomètre est proportionnelle à la différence de potentiel de ces points, et il suffit d'une simple lecture pour avoir cette différence.

Nous allons passer en revue les divers appareils employés. Ils sont pour la plupart analogues à ceux que nous avons rencontrés dans la mesure des intensités, sauf que la bobine galvanométrique est faite avec du fil très fin et possède une résistance considérable.

84. Voltmètre Deprez-Carpentier. — La construction du voltmètre est la même que celle de l'ampèremètre (fig. 19) ; la seule différence réside dans la composition de la bobine qui se trouve formée, cette fois, par un fil de cuivre très fin et très long dont la résistance est d'environ 2 000 ohms.

La graduation est tracée empiriquement pour chaque instrument ; la division à laquelle s'arrête l'aiguille donne donc le nombre de volts cherché.

Cet appareil est très employé dans les installations industrielles pour mesurer la différence de potentiel entre les bornes d'une machine, d'un groupe de lampes à incandescence ou d'une lampe à arc.

Il existe pour ces voltmètres des réducteurs qui en diminuent la sensibilité lorsque la différence de potentiel dépasse 120 volts ; ils se composent de bobines de résistances et se mettent en série avec le voltmètre.

Le réducteur n° 1 a une résistance égale à celle du voltmètre ; le n° 2, une résistance double ; le n° 3, une résistance triple ; ils servent respectivement pour mesurer des différences de potentiel de 0 à 200, à 300 et à 400 volts. Lorsqu'on les emploie, il faut multiplier le nombre lu sur la graduation par 2 pour le réducteur n° 1, par 3 pour le réducteur n° 2, par 4 pour le réducteur n° 3 ; car, dans chacun de ces cas, la différence de potentiel entre les bornes de l'instrument, c'est-à-dire la différence cherchée,

est double, triple ou quadruple de la différence aux bornes du voltmètre seul.

Emploi de l'appareil.— Le voltmètre se place en dérivation entre les deux points dont on veut déterminer la différence de potentiel, en reliant le pôle positif à la borne de gauche et le pôle négatif à la borne de droite, quand on n'emploie pas de réducteur.

Lorsqu'on ne connaît pas le sens du courant, on met le voltmètre en dérivation d'une façon quelconque ; si l'aiguille se meut vers la gauche, en dehors de l'échelle, il faut intervertir les communications.

Si l'on se sert d'un réducteur, on le place au-dessous du voltmètre. On serre fortement les lames qui relient les bornes du voltmètre et celles du réducteur, et l'on attache les conducteurs aux boutons placés sur la partie antérieure du réducteur, le pôle positif à gauche et le pôle négatif à droite.

85. Voltmètre de MM. Ayrton et Perry. — Tout à fait semblable à l'ampèremètre (§ 62). Seulement, chacun des deux fils qui composent la bobine galvanométrique a une résistance de 200 ohms ; la résistance totale de cette bobine est donc de 2 000 ohms si les fils sont en série, et de 20 ohms s'ils sont en quantité.

Emploi de l'appareil.— Lorsqu'on veut mesurer une différence de potentiel inférieure à 3 ou 4 volts, on met les fils de la bobine en série. On les emploie au contraire en quantité si cette différence est supérieure à 4 volts.

86. Voltmètre de sir William Thomson. — De même que l'ampèremètre représenté figure 22, le voltmètre Thomson doit être employé dans les mesures qui exigent une certaine précision.

Il ne diffère de l'ampèremètre que par la bobine ; celle-ci est formée d'un fil fin en maillechort de plus de 2 000 mètres de longueur, faisant environ 7 000 tours et présentant plus de 6 000 ohms de résistance.

Sa sensibilité est un peu inférieure à celle de l'ampèremètre. La graduation de la planchette part en moyenne de 6 pour arriver à $\frac{1}{16}$. Donc avec un aimant d'intensité égale à 8 (ce qui est le cas ordinaire), on va de 1,3 à 7 000 volts, et sans aimant il est

possible d'apprécier les différences de potentiel égales à 0,032 volt. Mais ces considérations sont plutôt théoriques, et, en pratique, il convient de ne pas dépasser 2 000 volts, parce que, à des tensions plus élevées, l'intensité du courant qui traverse la bobine serait assez grande pour chauffer le fil dont elle est formée et en compromettre l'isolement.

Le mode de graduation du voltmètre est analogue à celui adopté pour l'ampèremètre. Lorsque l'aiguille, placée dans un champ magnétique d'intensité égale à 1, est aux divisions 1, 2, 3, etc., de la planchette, elle dévie de 1, 2, 3, etc., divisions pour 1 volt. On a donc d'une manière analogue

$$E = \frac{H \times d}{n} \text{ volts,} \qquad (1)$$

lorsqu'on n'emploie pas l'aimant et

$$E = \frac{(H + F) \times d}{n} \text{ volts,} \qquad (2)$$

quand on se sert de l'aimant directeur.

La vérification de l'intensité magnétique de l'aimant se fait comme pour l'ampèremètre ; il en est de même pour le calcul de H, à la seule condition de remplacer le courant d'intensité connue par un courant de force électromotrice connue.

Emploi de l'appareil. — Lorsqu'il s'agit de différences de potentiel que l'on suppose supérieures à 10 volts, on emploie l'aimant directeur. Il suffit de placer le voltmètre en dérivation sur les deux points du circuit et d'éloigner plus ou moins l'aiguille, de façon à avoir une déviation suffisamment grande. Cela fait, on lit la déviation et la division de la planchette et l'on applique la formule (2).

Lorsque la différence de potentiel est estimée inférieure à 10 volts, on supprime l'aimant et l'on oriente l'appareil de façon à ce que l'index de l'aiguille soit au zéro de la graduation. On place ensuite le voltmètre en dérivation, on approche ou l'on éloigne l'aiguille et l'on applique la formule (1).

87. Voltmètre Cardew. — Le voltmètre du capitaine Cardew, qui est très employé en Angleterre et en Allemagne, est fondé sur

un principe tout différent de ceux des appareils que nous venons d'examiner. Il repose sur la dilatation d'un fil métallique traversé par le courant à étudier.

En effet nous avons vu que la quantité de chaleur développée par le passage du courant dans un fil de résistance R est $\frac{E^2}{R}$, en appelant E la différence de potentiel aux deux bornes de ce fil. La dilatation du fil qui est proportionnelle à cette quantité de

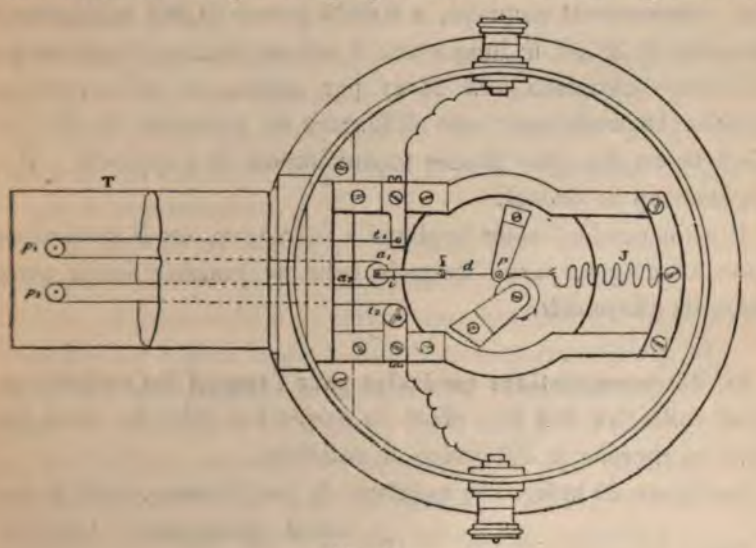


Fig. 38.

chaleur permet donc de mesurer cette différence, qui sera celle des points en question si le fil est établi en dérivation sur eux.

Les deux extrémités du fil sont fixées aux points t_1 et t_2 (fig. 38), qui communiquent directement avec les bornes de l'appareil. Afin de présenter une longueur suffisante sans donner à l'instrument un trop grand volume, le fil est replié plusieurs fois sur lui-même suivant le tracé t_1 p_1 a_1 a_2 p_2 t_2, en passant sur les poulies p_1, p_2, i. Les deux poulies p_1 et p_2 sont fixes ; la troisième est mobile et se déplace suivant les changements de longueur du fil, de telle sorte que ce sont ses déplacements qu'il s'agit de mesurer.

A cet effet, elle est fixée à une tige iI, à l'extrémité de laquelle est un fil métallique d passant deux fois sur la grande roue indiquée sur la figure et attaché au ressort J. Lorsque le fil s'allonge,

ce ressort, qui sert à le maintenir tendu, ramène la poulie *i* vers la droite et, par l'intermédiaire du fil *d*, fait tourner la roue. Celle-ci met en mouvement une petite roue dentée *p* avec laquelle elle engrène et qui porte l'index.

L'appareil se construit sur deux modèles qui permettent de mesurer l'un 60 volts, l'autre 120 volts ; leur seule différence consiste dans la longueur et le diamètre du fil. Le modèle de 120 volts, le plus couramment employé, a 0,0025 pouce (0,063 millimètre) de diamètre et $3^m,60$ de longueur ; il est en platine et présente une résistance d'environ 100 ohms par mètre, de telle sorte qu'il absorbe 40 watts pour une différence de potentiel de 120 volts. C'est là un des plus grands inconvénients de l'appareil : il consomme trop de travail.

Il est cependant assez appliqué à l'étranger, car il présente certains avantages, parmi lesquels celui de pouvoir servir avec les courants alternatifs.

88. Recommandations générales pour l'emploi des voltmètres. — Tout voltmètre doit être placé *en dérivation* entre les deux points dont on cherche la différence de potentiel.

La figure 39 indique le montage de l'expérience. Soit A un appareil quelconque, batterie de piles, machine, lampe, etc., dont on veut connaître la différence de potentiel entre les bornes *a*, *b*, cet appareil faisant partie d'un circuit quelconque CD. Le voltmètre G doit se mettre en dérivation sur les bornes *a*, *b*.

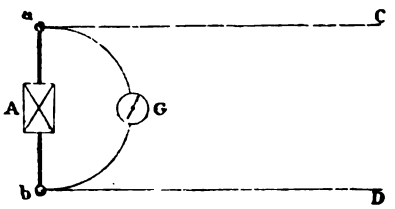


Fig. 39.

Dans chaque mesure, il faut suivre les prescriptions que nous avons données à la suite de l'étude de chaque appareil.

En outre, il ne faut laisser le voltmètre dans le circuit que le temps nécessaire pour faire les lectures ; le passage prolongé du courant finirait par échauffer le fil fin de la bobine et pourrait même le brûler. Les lectures doivent être espacées pour la même raison.

Quant au choix à faire, on a intérêt à prendre dans les installations industrielles le voltmètre Deprez-Carpentier (§ 84); au con-

traire, lorsqu'on veut étudier avec soin le fonctionnement d'un appareil, le voltmètre Thomson (§ 86) doit être préféré. Pour les différences de potentiel élevées, on a recours au voltmètre électrostatique Thomson (§ 78). Enfin, quand il s'agit de courants de piles, on peut employer la méthode de Law (§ 82) ou plutôt celle que nous allons donner plus loin (§ 93) pour la mesure de la force électromotrice.

89. Graduation des voltmètres. — De même que pour les ampèremètres, il peut être nécessaire à un moment donné de vérifier la graduation d'un voltmètre, surtout lorsqu'il renferme un aimant permanent, ou même de le graduer si cette opération n'a pas été faite par le constructeur.

Si l'on possède un voltmètre étalonné dont on soit absolument sûr, on peut vérifier les autres appareils par comparaison.

Mais il est préférable d'employer une méthode analogue à celle qui nous a servi pour la graduation des ampèremètres (§ 70).

On prend la disposition de la figure 27, et on étalonne le galvanomètre à réflexion G de manière qu'il donne un nombre déterminé de divisions par volt; ce nombre varie avec la limite supérieure du voltmètre que l'on veut graduer. (Il sera, par exemple, de 2 ou de 1 division par volt, suivant que le voltmètre sera destiné à mesurer des différences de potentiel de 60 ou de 110 volts.)

Ceci fait, on monte en circuit une pile ou une batterie d'accumulateurs dont la force électromotrice est au moins égale à la limite du voltmètre (60 ou 110 volts dans les cas que nous avons pris pour exemples), et une boîte de résistances destinée à faire varier la différence de potentiel aux bornes de cette boîte. Puis on mesure successivement cette différence de potentiel avec le voltmètre à étalonner et avec le galvanomètre gradué, en reliant les bornes de la boîte : 1° avec les bornes du voltmètre, 2° avec les points A, B de la figure.

On vérifie ainsi l'exactitude de chaque point de la graduation en modifiant à chaque fois la résistance de la boîte.

MESURE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

90. — La mesure des forces électromotrices ne peut se faire que si la source d'électricité est une pile. Elle est impossible dans le cas d'une machine, comme nous le verrons plus loin : la force électromotrice d'une dynamo se calcule et ne se mesure pas.

On mesure la force électromotrice d'une pile en comparant celle-ci à une autre pile prise comme étalon, la pile Daniell par exemple. Cette comparaison peut se faire de plusieurs manières ; nous allons indiquer celles qui sont le plus employées.

Dans les trois méthodes qui vont suivre, le galvanomètre doit être un appareil Thomson (§ 54), ou plutôt un appareil Deprez-d'Arsonval (§ 56).

91. Méthode de M. Lacoine. — La disposition de cette méthode est indiquée par la figure 40.

La pile que l'on veut étudier et celle qui sert d'étalon sont montées *en opposition* sur le galvanomètre, c'est-à-dire que les courants auxquels elles donnent naissance ont des sens contraires dans cet appareil. Des boîtes de résistances sont disposées en C et D entre les piles et un des points d'attache du galvanomètre.

On donne une valeur déterminée et constante à l'une des résistances, R_2 par exemple. Puis on fait varier l'autre résistance jusqu'à ce qu'il ne passe plus de courant dans le galvanomètre ; soit R_1 la valeur trouvée. Si l'on suppose que les résistances des piles sont négligeables, on a

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

En effet, du moment qu'il ne passe plus de courant dans le galvanomètre, c'est que les courants fournis par les deux piles se détruisent ; leurs intensités sont donc égales. Cela étant, si nous appliquons aux circuits E_1 AB et E_2 AB la deuxième loi de Kirchhoff, nous avons, en supposant la résistance des piles négligeable :

$$E_1 = IR_1$$
$$E_2 = IR_2$$

d'où

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1}{R_2}. \qquad (1)$$

Lorsque les résistances des piles sont inconnues, mais trop grandes pour être négligées, une légère modification à cette méthode permet de résoudre la question.

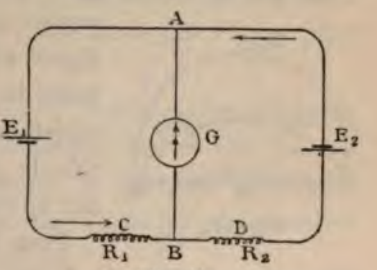


Fig. 40.

On fait une première expérience avec les résistances R_1 et R_2 comme précédemment. Puis on diminue R_2 et l'on prend une autre résistance r_2 fixe. On détermine une seconde fois la résistance en C, de façon que l'aiguille ne subisse pas de déviation. Soit r_1 la nouvelle valeur de cette résistance. On a

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1 - r_1}{R_2 - r_2}.$$

En effet, si nous appelons ρ_1 et ρ_2 les résistances des deux piles, la formule (1) nous permet d'écrire pour la première mesure :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1 + \rho_1}{R_2 + \rho_2} \qquad (2)$$

ou

$$E_1 R_2 - E_2 R_1 = E_2 \rho_1 - E_1 \rho_2$$

et pour la deuxième mesure

$$E_1 r_2 - E_2 r_1 = E_2 \rho_1 - E_1 \rho_2.$$

Egalons les premiers membres de ces deux équations :

$$E_1 R_2 - E_2 R_1 = E_1 r_2 - E_2 r_1$$

d'où

$$\frac{E}{E_2} = \frac{R_1 - r_1}{R_2 - r_2}. \qquad (3)$$

Si les résistances des piles sont connues, on peut se dispenser d'effectuer la deuxième mesure, et la formule (2) donne la solution cherchée.

La méthode de M. Lacoine est assez simple, mais elle exige que la pile soit constante et qu'elle ne présente pas les phénomènes

de polarisation dont nous parlerons dans le chapitre des *Piles*, condition rarement réalisée.

92. Méthode de Poggendorff. — Les deux piles E_1, E_2 sont disposées en opposition, comme l'indique la figure 41, avec un shunt AB formé par une boîte de résistances R. Une seconde boîte de résistances est placée en ρ sur le circuit de la pile la plus forte et un galvanomètre en G sur le circuit de l'autre pile.

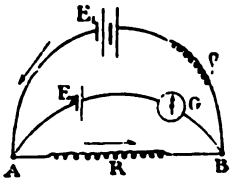


Fig. 41.

Pour faire l'expérience, on ajuste les deux résistances R et ρ de façon qu'il ne passe pas de courant dans le galvanomètre. On diminue ensuite ces deux résistances, et l'on arrive à n'avoir pas de déviation en G avec de nouvelles valeurs R' et ρ'. On alors

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R - R' + \rho - \rho'}{R - R'}.$$

En effet, puisqu'il ne passe pas de courant dans le conducteur AE_2B, l'intensité en E_1 et en R est la même ; soit I cette intensité. En appliquant la deuxième loi de Kirchhoff aux deux circuits fermés E_1ARB, E_2ARB, nous avons pour la première partie de l'expérience :

$$E_1 = I(r_1 + \rho + R)$$
$$E_2 = IR$$

r_1 étant la résistance de la pile E_1. Eliminons I

$$E_1 R = E_2 (r_1 + \rho + R). \qquad (1)$$

De même, nous aurons pour l'expérience faite avec les résistances R' et ρ'

$$E_1 R' = E_2 (r_1 + \rho' + R').$$

Eliminons r_1 en retranchant ces deux équations l'une de l'autre :

$$E_1 (R - R') = E_2 (\rho - \rho' + R - R')$$

ou

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R - R' + \rho - \rho'}{R - R'}.$$

Cette méthode doit être employée de préférence à la précédente ; elle offre l'avantage que la pile E_2 ne fonctionne pas et ne peut pas, par suite, se polariser. La pile E_1 seule produit un courant. Il faut donc qu'elle soit constante et on la forme de plusieurs éléments Daniell, afin qu'elle soit aussi plus forte que l'autre pile.

93. Méthode de la grande résistance. — C'est la méthode la plus pratique et la plus commode. Elle est fondée sur ce fait que les intensités fournies par différents éléments de pile sur un circuit extérieur très résistant (8 000 à 10 000 ohms) sont proportionnelles aux forces électromotrices de ces éléments.

En effet, comme nous l'avons vu précédemment, toute pile présente une certaine résistance intérieure r. Soient E la force électromotrice cherchée, I l'intensité du courant et R la résistance extérieure, on a, d'après la loi de Ohm,

$$E = I\,(R + r).$$

Mais la résistance r est toujours peu élevée, de telle sorte que le produit Ir est négligeable par rapport à IR lorsqu'on prend pour R une valeur considérable, et l'on peut écrire

$$E = IR.$$

Il résulte de là que, si l'on met successivement sur un même circuit très résistant deux piles de forces électromotrices E_1, E_2, le rapport de ces forces électromotrices sera égal au rapport des intensités I_1, I_2, car on aura :

$$E_1 = I_1R$$
$$E_2 = I_2R$$

d'où

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2}.$$

La méthode est fondée sur cette remarque. Elle consiste à mettre successivement dans un circuit comprenant un galvanomètre et une grande résistance la pile étalon et la pile à mesurer, et à prendre le rapport des deux déviations obtenues. Cette méthode présente l'avantage que, par suite même de la résis-

tance élevée du circuit, les piles ne peuvent pas se polariser pendant la durée de l'expérience.

La figure 27 indique le montage de l'expérience. A, B sont les deux bornes auxquelles on relie successivement les pôles des deux piles.

Emploi de la méthode. — On étalonne d'abord le galvanomètre G de manière que chaque division de l'échelle représente 0,01 volt; l'opération est identique à celle indiquée dans la graduation des ampèremètres (§ 70). Il suffit alors de remplacer l'étalon par l'élément à mesurer et d'additionner les deux déviations obtenues à droite et à gauche, pour avoir en centièmes de volt la force électromotrice cherchée.

Dans l'exemple que nous venons d'indiquer, la force électromotrice est obtenue en centièmes de volt. On pourrait l'avoir tout aussi bien en dixièmes ou millièmes de volt : il suffit de disposer les résistances de la boîte et du shunt de façon à ce que l'on ait pour l'élément étalon deux déviations dont la somme représente 10,7 ou 1 070 divisions.

MESURE DES RÉSISTANCES

Les méthodes imaginées pour la mesure des résistances sont assez nombreuses; mais il n'y en a guère qu'une seule qui soit réellement employée, c'est celle du pont de Wheatstone. Nous allons cependant dire quelques mots de la méthode de substitution; elle présente l'avantage d'être assez simple, mais, pour être exacte, elle exige une pile absolument constante.

94. Méthode de substitution. — Pour mesurer une résistance par la méthode de substitution, on dispose sur un même circuit une pile très constante, un galvanomètre[1] et la résistance en question, et on note la déviation obtenue sur l'échelle du galvanomètre.

[1] Pour toutes les mesures de résistances qui se font dans les laboratoires, on emploie les galvanomètres à réflexion Thomson ou Deprez-d'Arsonval. Ce sont les seuls qui donnent des indications assez exactes pour ces expériences toujours fort délicates. Le dernier galvanomètre est, comme nous l'avons déjà dit, d'un maniement plus facile.

On enlève alors la résistance inconnue et on la remplace par une boîte de résistances. La déviation du galvanomètre est plus grande que dans le premier cas, et on la ramène à avoir exactement la même valeur en ôtant des chevilles. Lorsque ce résultat est atteint, la résistance inconnue est égale à la somme des résistances des bobines débouchées.

Cette méthode est, on le voit, assez primitive. Outre qu'elle exige une pile constante pendant toute la durée de l'expérience, elle ne peut donner avec les boîtes ordinaires les valeurs des résistances qu'à une unité près ; elle est de plus impossible pour les résistances inférieures à 1 ohm, à moins que la boîte ne renferme des bobines dont la résistance soit elle-même plus faible que 1 ohm. En somme, c'est la composition de la boîte qui détermine l'approximation à laquelle on peut arriver.

95. Méthode du pont de Wheatstone. — Elle est fondée sur la remarque suivante : supposons que nous établissions deux déri-

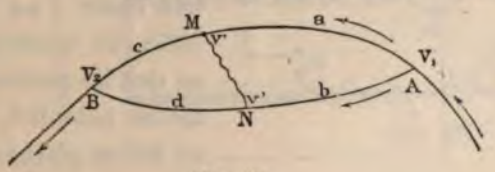


Fig. 42.

vations AMB,ANB entre deux points A, B d'un circuit électrique (fig. 42), et que nous joignions deux points M,N de ces dérivations ayant le même potentiel. D'après la définition même de cette expression, aucun courant ne passera dans le fil MN, puisque ce courant, s'il existait, serait dû à une différence de potentiel et que cette différence n'existe pas.

Mais, d'après la loi de Ohm, les différences de potentiel entre plusieurs points d'un même circuit électrique sont proportionnelles aux résistances qui sont comprises entre ces points. Si donc nous appelons V_1 et V_2 les potentiels des points A,B, v' celui des points M,N, et a, b, c, d les résistances des quatre conducteurs AM,AN, MB,NB, nous aurons sur le conducteur AMB

$$\frac{V_1 - v'}{a} = \frac{v' - V_2}{c};$$

et sur le conducteur ANB

$$\frac{V_1 - v'}{b} = \frac{v' - V_2}{d}.$$

Divisons ces deux équations membre à membre :

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

Cette relation est très importante; car elle permet, si l'une des quatre résistances a, b, c, d est inconnue, de la déterminer à l'aide des trois autres.

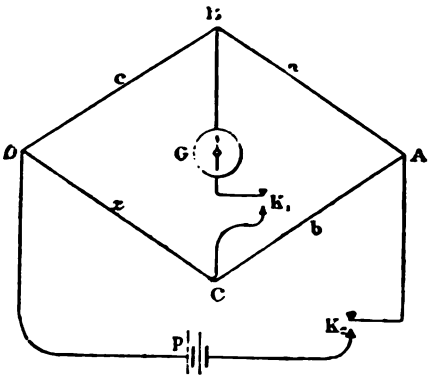


Fig. 43.

Emploi de la méthode. — Soit d la résistance inconnue. On se donne *a priori* les valeurs des résistances a, b, et l'on fait varier c au moyen d'une boîte de résistances jusqu'à ce que les points M,N aient le même potentiel. On constate ce fait en plaçant un galvanomètre entre ces deux points : l'aiguille ne doit subir aucune déviation. On a alors

$$d \text{ ou } x = \frac{bc}{a}.$$

La figure schématique par laquelle on représente le pont de Wheatstone est ordinairement un parallélogramme ABCD (fig. 43). La pile P productrice du courant est sur la diagonale AD. Les trois résistances a, b, c connues et la résistance cherchée x sont placées sur les quatre côtés de ce parallélogramme. On met le galvanomètre G sur la diagonale BC. Lorsque ce galvanomètre est très sensible, on a intérêt à ne pas le faire traverser par un courant trop intense et on le shunte ; ce shunt est supprimé dans la suite de l'expérience quand on se rapproche de la position d'équilibre. On place aussi une clef en K_1, pour que le courant passe

dans le galvanomètre pendant un instant seulement. De même, il faut mettre une seconde clef en K_2, afin de ne faire travailler la pile qu'au moment voulu et d'éviter la polarisation. Cette dernière clef K_2 doit être fermée avant l'autre.

96. Pont de Wheatstone ordinaire. — L'appareil se compose ordinairement de bobines de résistances placées sur plusieurs rangs (fig. 44). Les côtés AB, AC du parallélogramme précédent renferment chacun des bobines de 10, 100, 1000 ohms; le côté BD

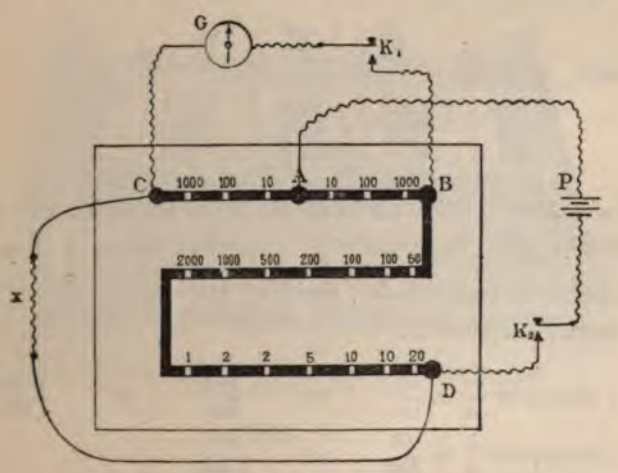


Fig. 44.

contient une série de résistances comprises entre 1 et 2 000 ohms. Enfin, aux points A, B, C, D qui représentent les sommets du parallélogramme, sont des bornes auxquelles on fixe les conducteurs allant au galvanomètre, à la pile et à la résistance inconnue.

Emploi de l'appareil. — On établit la pile avec sa clef K_2 entre les bornes A et D (fig. 44), et le galvanomètre avec sa clef K_1 entre les bornes B et C. On met ensuite la résistance inconnue x entre les bornes C et D, de manière que cette résistance constitue le quatrième côté du parallélogramme. Si le courant est énergique, on shunte le galvanomètre.

Cela fait, on débouche les résistances a et b en AB et AC; puis,

59973A

sans rien déboucher sur le côté BD, on ferme la clef K_2 et l'on appuie un instant sur la clef K_1. On obtient une déviation dont on observe le sens.

On débouche alors en BD, jusqu'à ce qu'on obtienne une déviation de sens contraire à la première, en appuyant sur la clef K_1. Le changement de sens de la déviation indique que la résistance débouchée en BD est trop forte. On la diminue et l'on opère ainsi par tâtonnements, jusqu'à ce qu'on ait deux déviations en sens opposés pour deux valeurs de la résistance BD différant d'une unité. Soient R et R + 1 ces deux valeurs, on a :

$$R < c < R + 1$$

et par suite

$$\frac{b}{a} R < x < \frac{b}{a}(R + 1).$$

Degré d'approximation de la méthode. — La résistance cherchée étant donnée par l'expression $\frac{bc}{a}$, l'approximation à laquelle on arrive dépend du rapport $\frac{b}{a}$. Suivant les valeurs de ce rapport, l'erreur sera inférieure à :

1 ohm pour $\frac{b}{a} =$	$\frac{10}{10}$	ou	$\frac{100}{100}$	ou	$\frac{1\,000}{1\,000}$
0,1 ohm pour $\frac{b}{a} =$	$\frac{10}{100}$	ou	$\frac{100}{1\,000}$		
0,01 ohm pour $\frac{b}{a} =$	$\frac{10}{1\,000}$				

Quant aux résistances a et b, on doit les choisir d'autant plus grandes que les résistances x et c sont elles-mêmes plus considérables. M. Schwendler a démontré que les conditions de maximum de sensibilité sont réalisées lorsque les deux dérivations constituées, d'une part par les côtés AB et AC, d'autre part par les côtés BD et CD, ont une résistance égale.

97. Boîte à décades. — Dans le pont que nous venons de décrire, les chevilles sont en nombre égal à celui des bobines de résistances ; les contacts sont donc nombreux et, comme chacun d'eux peut donner lieu à une légère erreur suivant que la cheville

est plus ou moins enfoncée, la mesure finale peut se trouver quelque peu faussée. L'appareil construit par M. Carpentier et désigné sous le nom de *boîte à décades* (fig. 45) remédie à cet inconvénient en réduisant le nombre des chevilles à son minimum.

Dans ce but, les bobines de résistances sont disposées parallèlement les unes aux autres ; pour les deux côtés AB, AC, elles sont placées entre la tige métallique passant par la borne centrale postérieure et les blocs marqués 10, 100, 1000, de telle sorte que chacune d'elles se trouve introduite dans le circuit lorsque la che-

Fig. 45.

ville est engagée dans l'échancrure correspondante. Il en est de même pour le troisième côté du pont où les bobines sont comprises entre les barres transversales partant de la barre médiane longitudinale et les blocs marqués 1, 2, 3..., 9.

De plus, comme on le voit sur la figure, les bobines de ce troisième côté sont réparties suivant quatre rangées parallèles ; celle de gauche représente les mille, puis viennent les centaines, les dizaines et les unités. Cette disposition facilite beaucoup les lectures ; en effet, une fois l'équilibre du pont obtenu, on n'a qu'à prendre le chiffre de la résistance de chacune des quatre rangées où se trouve la cheville, en commençant par la gauche, et l'on a, sans faire aucune addition, la valeur de la résistance du troisième côté.

L'insertion du pont dans le circuit se fait comme pour l'autre

appareil. La résistance à mesurer se place toujours entre les bornes C, D ; la pile entre A, D ; le galvanomètre entre B, C.

98. Rhéocorde. — Lorsqu'on veut déterminer une faible résistance ou obtenir une très grande exactitude, la méthode du pont de Wheatstone est encore applicable ; mais la boîte de résistances que nous venons de décrire n'est plus suffisante. On a alors recours à un *rhéocorde*.

Cet appareil comprend un fil de platine de résistance connue, tendu parallèlement à une règle divisée. Ce fil est en contact avec un curseur métallique, mobile le long de la règle, par lequel il reçoit le courant. Le courant parcourt ensuite le fil jusqu'à son extrémité ; la résistance qui lui est offerte varie suivant la longueur de la partie parcourue et, par suite, selon la position du curseur.

Emploi de l'appareil. — Le rhéocorde s'emploie de deux façons.

Si l'on veut mesurer avec exactitude une grande résistance, on l'ajoute dans le pont à la suite du côté BD de la boîte (fig. 44). Si, au contraire, la résistance cherchée est assez faible, on supprime ce côté BD et on le remplace par le rhéocorde.

Dans les deux cas, on déplace le curseur le long du fil jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre ne subisse aucune déviation. Ce résultat obtenu, la division de la règle à laquelle le curseur se trouve arrêté indique la résistance c, si le rhéocorde est employé seul, ou la quantité à ajouter à c, si le rhéocorde est adjoint au côté BD du pont.

99. Pont de Wheatstone à fil de platine et règle divisée. — Au lieu de donner des valeurs constantes aux résistances a et b, et de faire varier c, on peut ne laisser fixe que la résistance b et faire varier le rapport $\frac{c}{a}$ à la condition que la somme de ces deux quantités $a + c$ reste constante.

L'appareil au moyen duquel on opère ainsi la mesure des résistances est un *pont de Wheatstone à fil de platine et à règle divisée*.

Il se compose d'un fil de platine FF' (fig. 46) ayant 1 mètre de longueur et 1,5 millimètre de diamètre, tendu entre les extrémités

P,P' d'une large bande de cuivre coupée en *mn* et *pq*, et parallèle à une échelle de 1 mètre de longueur, divisée en millimètres, de telle sorte que les divisions 0 et 1000 correspondent aux deux extrémités du fil. Un curseur métallique B se déplace le long de cette règle et peut, à un moment donné, être mis en contact avec le fil.

Emploi de l'appareil. — On place en *pq* la résistance fixe *b* et en *mn* la résistance inconnue *x*. Les fils de la pile aboutissent aux bornes P,P', et ceux du galvanomètre à la borne C et au curseur B, placé au zéro de la graduation. Cela fait, on déplace le curseur

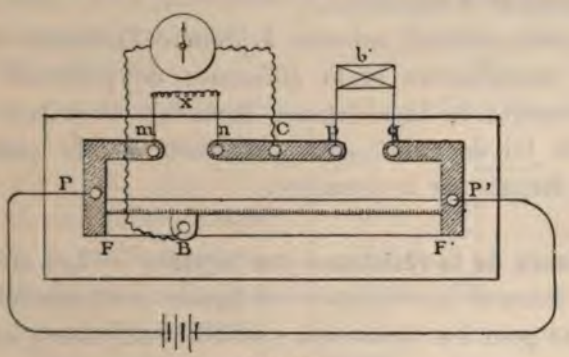


Fig. 46.

jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre ne subisse plus aucune déviation.

Lorsque ce résultat est obtenu, on lit la division devant laquelle est arrêté le curseur, soit *n* millimètres. Le rapport $\frac{n}{1000 - n}$ est égal à $\frac{a}{c}$, et il suffit de le porter dans la formule, sans s'occuper de la résistance même du fil de platine. On aura par suite

$$x = b \frac{n}{1\,000 - n}.$$

100. Comparaison de deux résistances. — L'appareil décrit ci-dessus est naturellement d'un emploi tout indiqué lorsqu'il s'agit, non pas de mesurer une résistance donnée, mais de trouver la valeur relative de deux résistances. Il suffit de mettre ces deux résistances en *mn* et en *pq*, et leur rapport est égal à celui des distances du curseur aux extrémités du fil.

101. — La méthode du pont de Wheatstone ne permet pas de mesurer la résistance d'un appareil, quand cet appareil fait déjà partie d'un circuit électrique parcouru par un courant. Car il faut alors interrompre ce circuit et prendre les mesures *à froid*, suivant l'expression adoptée. Dans certains cas, pour les bobines des machines électriques et les lampes à incandescence, par exemple, la résistance n'est plus la même à froid et à chaud, c'est-à-dire lorsque ces bobines ou ces lampes sont au repos et lorsqu'elles fonctionnent. Il est donc utile de pouvoir connaître la résistance dans ce dernier cas, et il faut avoir recours à une autre méthode que celle du pont de Wheatstone.

Le procédé habituel consiste à prendre l'intensité du courant avec un ampèremètre et la différence de potentiel entre les deux extrémités de la résistance inconnue avec un voltmètre. D'après la loi de Ohm, cette résistance est le quotient de la deuxième lecture par la première.

102. Mesure de la résistance des liquides. — Les méthodes qui servent à mesurer la résistance des liquides sont naturellement les mêmes que pour les conducteurs solides. Seulement, cette opération présente certaines difficultés d'expérience sur lesquelles nous croyons devoir dire quelques mots.

Il peut arriver en effet que le courant électrique décompose la dissolution et produise sur les électrodes une couche gazeuse ; ce phénomène de polarisation tend à faire paraître la résistance plus grande qu'elle ne l'est en réalité. Parmi les premiers procédés proposés pour remédier à cet inconvénient, nous pouvons citer celui qu'à imaginé M. Mather, à la suite des expériences de MM. Ayrton et Perry sur la résistance des liquides.

Le liquide, que doit traverser le courant électrique, est enfermé dans un tube, entre deux disques métalliques d'un diamètre presque égal à celui du tube ; l'un des disques est mobile suivant l'axe de ce dernier; l'autre est fixe, de façon qu'on peut modifier à volonté la distance qui les sépare. On place aussi dans le circuit un galvanomètre dont on note la déviation pour un écartement l des disques. Cela fait, on donne à cet écartement une valeur plus petite l', et on ajoute une résistance R, de telle sorte que la déviation du

galvanomètre reste la même. D'après le principe de la méthode de substitution, la quantité R représente la résistance de la colonne $l - l'$ de liquide.

Le résultat obtenu est d'autant plus exact que les valeurs de l et l' sont plus grandes.

M. Kohlrausch a indiqué une autre solution de ce problème en remplaçant le courant continu, ordinairement employé, par des courants alternatifs, et en augmentant le plus possible la surface des électrodes, tous moyens destinés à réduire la polarisation.

103. Résistance d'un galvanomètre. — La méthode de Sir W. Thomson repose sur l'emploi du pont de Wheatstone.

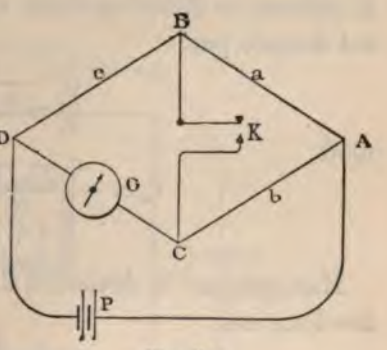


Fig. 47.

Supposons que dans ce pont, au lieu de placer le galvanomètre sur la diagonale BC (fig. 47), où nous ne laissons qu'une simple clef K, nous le mettions en G, sur le côté CD du pont, à la place de la résistance inconnue mesurée dans le paragraphe 95.

Disposons ensuite la résistance c de telle sorte que la déviation du galvanomètre reste la même pendant la fermeture et l'ouverture de la clef. Cette condition remplie, nous aurons

$$G = \frac{bc}{a}.$$

En effet, considérons d'abord le cas où la clef est ouverte. Soient I_t l'intensité totale du courant fourni par la pile et I_g l'intensité qui passe dans le galvanomètre. D'après les formules des dérivations,

$$\frac{I_g}{I_t} = \frac{\dfrac{(a+c)(b+G)}{a+c+b+G}}{b+G} = \frac{a+c}{a+c+b+G}.$$

Mais r étant la résistance de la pile, on a

$$I_t = \frac{E}{r + \dfrac{(a+c)(b+G)}{a+c+b+G}}.$$

Donc

$$I_g = \frac{E}{r + \frac{(a+c)(b+G)}{a+c+b+G}} \times \frac{a+c}{a+c+b+G}$$

$$I_g = \frac{E(a+c)}{r(a+c+b+G) + (a+c)(b+G)}. \qquad (1)$$

Fermons la clef maintenant, ce qui revient à confondre les deux points B et C, l'intensité totale I'_t est

$$I'_t = \frac{E}{r + \frac{ab}{a+b} + \frac{cG}{c+G}}.$$

D'un autre côté, entre les points B et C confondus et le point D, le courant se divise en deux, et l'intensité I'_g dans le galvanomètre est donnée par

$$\frac{I'_g}{I'_t} = \frac{\frac{cG}{c+G}}{G} = \frac{c}{c+G}$$

d'où

$$I'_g = \frac{E}{r + \frac{ab}{a+b} + \frac{cG}{c+G}} \times \frac{c}{c+G}. \qquad (2)$$

Mais puisque la déviation du galvanomètre reste la même dans les deux cas,

$$I_g = I'_g.$$

En remplaçant ces intensités par les valeurs précédemment trouvées (1) et (2) et simplifiant l'équation, on arrive finalement à

$$\frac{G}{c} = \frac{b}{a}.$$

La mesure de la résistance d'un galvanomètre se déduit facilement de ce qui précède.

Application de la méthode. — On met le galvanomètre à étudier sur un des côtés du pont, à la place de la résistance inconnue dans la disposition ordinaire, et l'on intercale une clef K sur la diagonale BC. On se donne *a priori* les résistances a et b, et l'on fait varier la résistance c jusqu'à ce que la déviation du galvanomètre ne change pas lorsqu'on ferme ou qu'on ouvre la clef. La figure 48 montre la disposition pratique de l'expérience. On a alors

$$G = c \times \frac{b}{a}.$$

On a intérêt, en faisant cette expérience, à prendre pour b des résistances assez faibles et à donner au contraire à a de fortes valeurs, mais sans exagérer pourtant, de façon que c reste toujours dans les limites de la boîte que l'on possède.

104. Résistance intérieure d'une pile. — Comme nous l'avons vu précédemment, de même que les conducteurs offrent une certaine résistance au passage du courant, la pile présente elle aussi une résistance à ce courant qu'elle produit. C'est ce qu'on appelle la *résistance intérieure* de la pile. Elle varie avec la distance des deux pôles, leur surface, la nature, la concentration et l'acidité du liquide, etc...

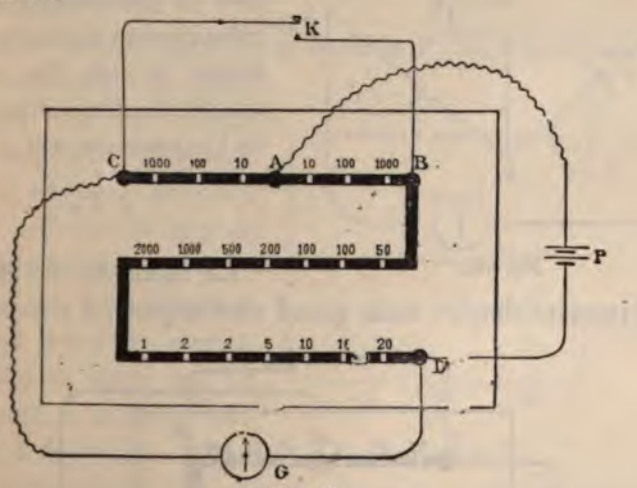


Fig. 48.

Cette résistance intérieure est utile à connaître; car il faut en tenir compte dans toutes les applications que l'on fait de la pile. Sa mesure peut s'effectuer de différentes façons.

105. *Méthode de Mance.* — Cette méthode, où l'on emploie le pont de Wheatstone, est semblable à celle qui donne la résistance d'un galvanomètre (§ 103), avec cette seule différence qu'on substitue le galvanomètre à la pile et réciproquement (fig. 49). Une démonstration analogue permet d'établir la formule

$$\frac{\rho}{c} = \frac{b}{a}.$$

Cette méthode peut être employée avec toutes les piles, constantes ou non; car le temps infiniment petit qui sépare les deux observations, c'est-à-dire le temps de fermer la clef, n'est pas suffisant pour que la résistance intérieure ait pu changer.

Application de la méthode. — On met la pile sur le côté du pont où l'on place habituellement la résistance inconnue dans la mesure d'une résistance. Une des diagonales du pont renferme un galvanomètre et l'autre une clef. On se donne *a priori* les résistances a et b, et l'on détermine la valeur de c de façon que la déviation du galvanomètre reste la même lorsqu'on ouvre ou qu'on ferme la clef. La figure 50 montre la disposition pratique de l'expérience. On a alors

$$\rho = c\,\frac{b}{a}.$$

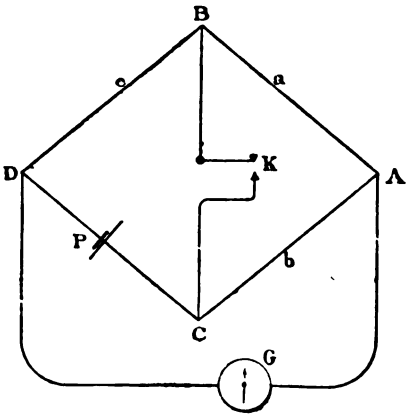


Fig. 49.

La méthode de Mance est excessivement simple; mais quand on l'emploie, il arrive souvent,

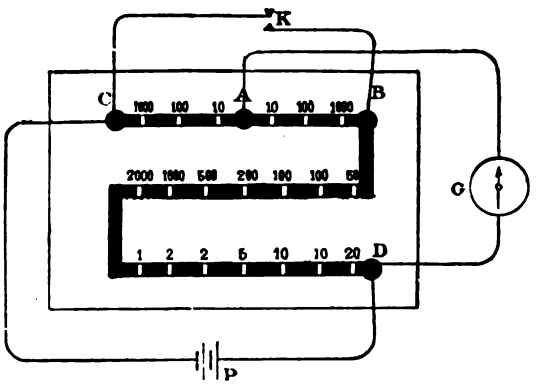


Fig. 50.

surtout avec les galvanomètres très sensibles, que le courant est trop énergique et imprime à l'aiguille aimantée une déviation trop considérable. Avec l'appareil à réflexion de sir W. Thomson, par exemple, il est difficile de maintenir l'image lumineuse dans les

limites de l'échelle. On a proposé de remédier à cet inconvénient, en plaçant près du galvanomètre un aimant directeur, dont l'action est contraire à celle du courant et atténue la déviation de l'aiguille, en diminuant la sensibilité du galvanomètre.

106. *Méthode de Munro.* — Les condensateurs peuvent aussi servir à mesurer la résistance intérieure d'une pile. Ce procédé est même un des meilleurs en pratique; car le temps pendant lequel la batterie fonctionne est infiniment petit et ne lui permet pas de se polariser. Aussi la méthode de Munro est-elle applicable à toutes les piles et donne-t-elle des indications très exactes. En voici le principe :

Mettons en circuit (fig. 51) la batterie P, un condensateur C et un galvanomètre G, ainsi qu'une clef K_1. En fermant cette clef, la pile charge le condensateur à travers le galvanomètre, et le courant produit une déviation instantanée d. Ce courant est dû à la différence de potentiel des pôles, c'est-à-dire, comme on opère sur un circuit ouvert, à la force électromotrice E de la pile.

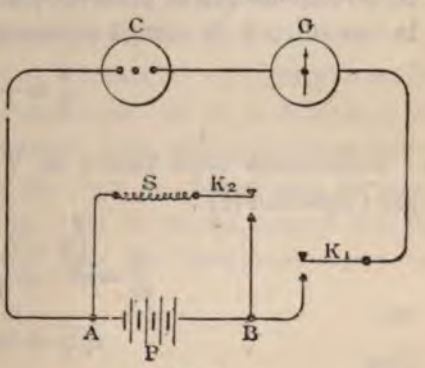


Fig. 51.

Soient Q la quantité d'électricité mise en jeu et G la résistance du galvanomètre; nous avons dans le circuit BGCA extérieur à la pile

$$Q = \frac{E}{G};$$

et, en admettant que les déviations du galvanomètre sont proportionnelles aux quantités d'électricité qui traversent l'appareil,

$$d_1 = \frac{E}{G}. \qquad (1)$$

La clef K_1 restant fermée, établissons un shunt S sur les pôles de la batterie. Nous observons sur le galvanomètre une nouvelle déviation d_2 en sens contraire de la précédente; cette déviation

est due à ce que la différence de potentiel des pôles a diminué par suite de l'insertion du shunt, et que les bornes du condensateur se sont trouvées avoir des potentiels supérieurs à ceux des pôles. Soit V la nouvelle différence de potentiel des pôles. Nous pouvons écrire

$$d_2 = \frac{E - V}{G}. \qquad (2)$$

Il est d'ailleurs facile de déterminer cette valeur V en fonction de la force électromotrice E. En effet, dans le circuit fermé ABK_2S, les différences de potentiel sont proportionnelles aux résistances. Or, en appelant r la résistance intérieure de la pile, la force électromotrice E correspond à la résistance totale du circuit $S + r$, tandis que la différence de potentiel V ne correspond qu'à la résistance S du circuit extérieur. Donc

$$\frac{V}{E} = \frac{S}{r + S}.$$

Substituons cette valeur de V dans l'équation (2) et divisons par l'équation (1) :

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{\left(E - E\frac{S}{r + S}\right)}{G} \times \frac{G}{E}$$

ou

$$d_2 (r + S) = d_1 r;$$

d'où

$$r = S\frac{d_2}{d_1 - d_2}.$$

Le procédé pour mesurer la résistance d'une pile se déduit de ce qui précède.

Emploi de la méthode. — Après avoir mis la pile, le condensateur et le galvanomètre en circuit, comme l'indique la figure 51, on ferme la clef K_1 et on note la déviation d_1 obtenue.

La clef K_1 étant toujours fermée, on établit un shunt S entre les pôles de la batterie en appuyant sur la clef K_2. On note la déviation d_2 du galvanomètre. La résistance de la pile est donnée par

$$r = S\frac{d_2}{d_1 - d_2}.$$

Il faut prendre le galvanomètre à réflexion de sir W. Thomson.

MESURE DE LA CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

107. — La mesure des capacités électriques reçoit peu d'applications dans l'industrie ; elle n'est guère employée que pour les câbles sous-marins. Cependant, on peut quelquefois désirer connaître la capacité d'un condensateur que l'on possède dans son laboratoire ; cette mesure se fait de la manière suivante, à la condition de disposer d'un condensateur étalon.

On charge avec une pile le condensateur étalon de capacité C_1 et on le décharge sur un galvanomètre, en notant la déviation d_1 obtenue. (Le galvanomètre Thomson à réflexion est le seul qui puisse être employé dans ce cas.) On recommence les mêmes opérations avec le condensateur étudié ; soient C_2 sa capacité et d_2 la nouvelle déviation. On sait que la capacité est proportionnelle à la quantité d'électricité et en raison inverse de la différence de potentiel ; comme, dans le cas présent, cette différence de potentiel est la force électromotrice de la pile, qui ne change pas, les deux capacités C_1, C_2 sont entre elles dans le même rapport que les quantités d'électricité, ou encore que les déviations observées. Par suite

$$C_2 = C_1 \frac{d_2}{d_1}.$$

En raisonnant ainsi, on admet que le galvanomètre employé donne des déviations proportionnelles aux quantités d'électricité. Si cela n'est pas, on shunte le galvanomètre et, en donnant à ce shunt des valeurs S_1, S_2, on arrive à obtenir la même déviation dans les deux expériences.

On a alors

$$C_2 = C_1 \frac{\dfrac{G + S_1}{S_1}}{\dfrac{G + S_2}{S_2}}.$$

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'énergie peut se manifester sous des formes différentes, chaleur, travail mécanique ou courant électrique, dont les deux der-

nières seulement nous intéressent. L'électricien industriel n'a pas, en effet, à faire usage des procédés calorimétriques; la mesure exacte du travail mécanique, au contraire, joue aujourd'hui un grand rôle dans les applications de l'électricité et notamment dans la transmission de la force à distance. Quant à la mesure de l'énergie électrique, nous n'avons pas besoin d'insister sur son importance.

108. Mesure de l'énergie électrique. — Comme nous l'avons vu § 43, l'énergie électrique dépensée dans un appareil pendant un temps T est donnée en volt-coulombs par le produit de la différence de potentiel par la quantité d'électricité qui a traversé l'appareil, et celle dépensée pendant une seconde est le produit de la différence de potentiel par l'intensité. (Pour transformer cette énergie en kilogrammètres, il suffit de diviser ce produit par 9,81, accélération de la pesanteur.)

On peut donc, pour avoir l'énergie dépensée, mesurer l'intensité et la différence de potentiel. Les ampèremètres et voltmètres dont nous avons parlé précédemment sont dans ce cas d'un emploi tout indiqué.

C'est sur cette remarque que sont fondés les compteurs d'énergie électrique employés dans les stations centrales pour mesurer la consommation des abonnés. Un appareil électrique quelconque fonctionnant avec une intensité I et une différence de potentiel aux bornes E dépensera pendant un temps élémentaire dt une quantité d'énergie égale à $EIdt$. Pour avoir l'énergie W dépensée pendant le temps T, il suffit d'intégrer l'expression $EIdt$ de 0 à T, d'où

$$W = \int_0^T EI\,dt.$$

Tout appareil effectuant cette intégration est un compteur d'énergie électrique. Nous allons décrire rapidement les plus employés. Leur principe repose en général sur l'action réciproque de deux bobines placées dans des positions rectangulaires. L'une d'elles, formée de fil très fin est mise en dérivation sur les bornes de l'appareil où s'effectue le travail cherché; elle donne la diffé-

rence de potentiel. L'autre, à gros fil, est traversée par le courant lui-même et indique l'intensité. Une bobine est fixe; l'autre est mobile. Il en résulte que la déviation subie par cette dernière mesure le produit de la différence de potentiel par l'intensité, c'est-à-dire la puissance. L'intégration de celle-ci donne l'énergie électrique.

109. Compteur Aron. — Un des appareils de cette classe le plus simples est celui de M. Aron. Il est basé sur le même principe que le compteur (§ 76), avec cette différence que l'aimant du pendule est remplacé par une bobine horizontale à fil fin montée en dérivation sur le circuit électrique et placée à l'intérieur de la bobine fixe à gros fil. Le courant arrive à la bobine à fil fin par la tige du pendule.

L'avance de celui-ci sur le pendule ordinaire mesure l'énergie électrique fournie à l'abonné.

110. Compteur Frager. — Cet appareil dont la description détaillée nous entraînerait beaucoup trop loin, se compose essentiellement de quatre parties : l'électrodynamomètre, le mouvement d'horlogerie, le secteur d'intégration et le totalisateur.

L'électrodynamomètre est formé de deux bobines, l'une fixe en série sur le circuit, l'autre mobile à l'intérieur de la première autour d'un axe vertical et montée en dérivation. Cette dernière porte une aiguille horizontale terminée par une partie saillante.

Le mouvement d'horlogerie est commandé par un spiral entretenu électriquement.

Le secteur d'intégration représente la partie originale du compteur : c'est une pièce d'acier ayant la forme du colimaçon de Pascal, fixée par son centre géométrique à la minuterie et dont la face supérieure est horizontale. Il est donc animé d'un mouvement de rotation uniforme.

En dessous se trouve une roue dentée commandant le totalisateur et ne se mettant en mouvement que si, en exerçant une pression sur le secteur d'intégration, on fait mordre un cliquet. Elle devient alors solidaire du secteur, tourne avec lui et détermine la mise en marche des aiguilles du totalisateur.

Le fonctionnement de l'appareil est le suivant : sous l'influence du courant, la bobine mobile de l'électrodynamomètre est déviée et, en même temps qu'elle, l'aiguille horizontale qui lui est fixée. Le système prend une position d'équilibre. A ce moment le secteur d'intégration, entraîné par le mouvement d'horlogerie, se présente, l'aiguille glisse sur un plan incliné, et sa partie saillante vient en contact avec la face supérieure du secteur.

Pendant la durée de son contact avec le secteur d'intégration, l'aiguille de l'électrodynamomètre bute contre une barre horizontale, fléchit en son milieu et, par suite, exerce sur le secteur une pression que l'on peut supposer verticale. Le secteur, supporté par un ressort, s'abaisse, le cliquet engrène la roue dentée et le totalisateur compte, et cela durant tout le temps que l'aiguille reste en contact avec le secteur.

La forme et la position de ce dernier ont été déterminées de telle sorte que l'arc de cercle décrit sur le secteur par l'extrémité de l'aiguille soit proportionnel à l'angle de déviation et par suite au produit EI de l'action réciproque des deux bobines ; et comme les indications du totalisateur sont proportionnelles au temps que l'aiguille reste en contact avec le secteur, elles expriment le produit de EI par le temps, c'est-à-dire la consommation d'énergie électrique.

Le compteur Frager est appliqué à Paris à la station des halles centrales et sur le secteur de la *Société pour la transmission de la force par l'électricité*.

111. Compteur Marès. — Ce compteur, représenté figure 52, comporte un appareil de mesure de la puissance et un système d'intégration de la puissance par rapport au temps.

L'appareil de mesure est constitué par deux bobines fixes à axe vertical (fig. 53) et à gros fil traversées par le courant même, et d'une bobine mobile à fil fin établie en dérivation. Celle-ci est sollicitée de haut en bas par l'action concordante des deux bobines fixes, et la force à laquelle elle est soumise est, comme nous l'avons dit ci-dessus, constamment proportionnelle à la puissance.

Cette bobine mobile est suspendue à l'extrémité d'un levier horizontal AB, dont le point d'appui est en *b*, et qui n'est autre chose

qu'un fléau de balance romaine, au moyen duquel on pèse la force exercée sur la bobine mobile.

A cet effet, le fléau AB porte un chariot *rs* auquel est suspendu

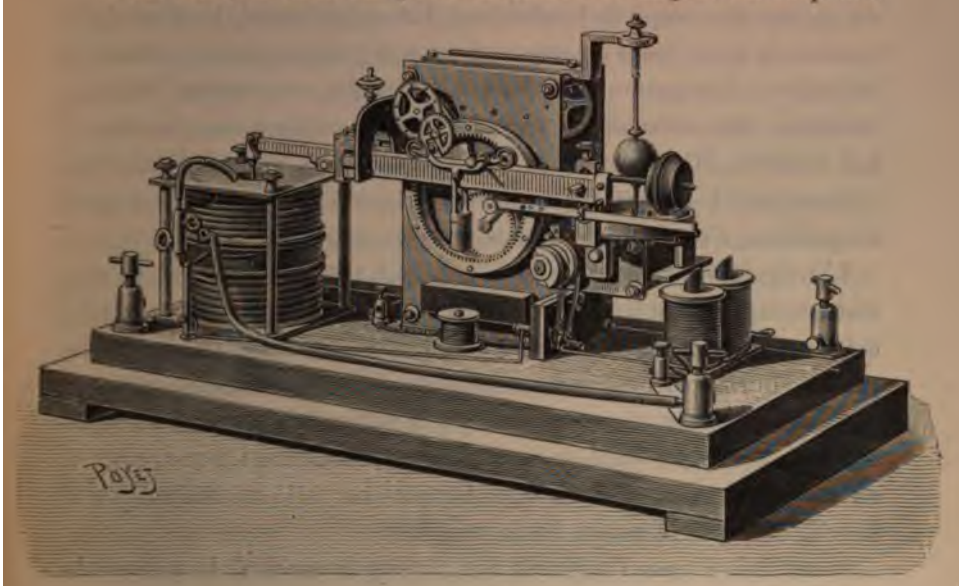


Fig. 52.

un peson *g*. Lorsque aucun courant ne traverse l'appareil et que le chariot peson est au zéro, le système est en équilibre sur son point

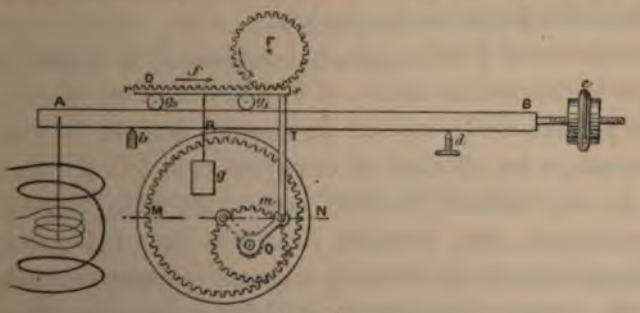


Fig. 53.

d'appui *b*. Si au contraire la bobine mobile est attirée, il faut déplacer le chariot vers la droite pour rétablir l'équilibre et cela d'une quantité qui, en vertu du principe de la romaine, est proportionnelle à la force appliquée en A, ou par suite à la puissance du courant.

Il suffit donc, pour avoir cette puissance, de mesurer le déplacement du chariot. Dans ce but celui-ci porte à sa partie supérieure une crémaillère engrenant avec une roue dentée F, premier rouage du cadran du compteur totalisateur. En se déplaçant, le chariot fait tourner la roue jusqu'au moment où son poids équilibre l'action de la bobine. A ce moment le fléau AB bascule, son extrémité droite s'abaisse et la crémaillère cesse d'être en contact avec la roue F qui s'arrête. Il résulte de là que cette roue a tourné d'un angle proportionnel au chemin parcouru depuis le zéro jusqu'au point d'équilibre, c'est-à-dire à la puissance du courant.

L'intégration de la puissance s'obtient alors en donnant au chariot un mouvement de va-et-vient périodique. Ce mouvement lui est imprimé par un engrenage double de Lahire mû par un mécanisme d'horlogerie, engrenage composé d'une roue dentée intérieurement MN et d'une roue intérieure O portant un nombre de dents égal à la moitié de celui de la roue MN, c'est-à-dire tel que, comme on le démontre en cinématique, le point *m*, relié au chariot par la tige T, décrit le diamètre horizontal MN.

Pour éviter que l'appareil ne décompte pendant le retour du chariot, alors que la crémaillère entraînerait la roue F en sens inverse, le courant traversant la bobine mobile à fil fin est coupé pendant ce temps. Le levier AB reste alors au repos sur son butoir *d* et maintient la crémaillère écartée de la roue F pendant toute la durée du retour du chariot.

Le mouvement d'horlogerie, qui commande le chariot, est entretenu par le courant lui-même, et le remontage en est effectué pendant la période d'interruption du courant dans la bobine à fil fin. Ce remontage est effectué en envoyant cinq fois par demi-tour, à l'aide de cinq contacts frottants convenablement distribués sur la roue principale, cinq courants successifs dans l'électro-aimant de remontage. Chacun de ces cinq courants remonte le système d'une dent, et, comme pendant une période complète, le ressort se démonte de cinq dents, il en résulte qu'il conserve toujours très sensiblement la même tension, condition essentiellement favorable à la régularité de marche du mouvement d'horlogerie ; ce mouvement est commandé dans l'appareil Marès par un pendule conique, dans le but d'éviter toute vibration et toute trépidation, le pendule

conique conservant, par son principe même, une vitesse toujours uniforme.

112. Compteur de temps. — Les compteurs dont nous venons de parler sont adoptés dans les stations centrales d'éclairage électrique qui font payer le courant suivant l'énergie consommée par les abonnés. Dans certains cas, on peut avoir recours à des appareils plus simples et se contenter de mesurer la durée totale de fonctionnement des lampes, lorsqu'il s'agit, par exemple, d'un groupe de lampes fonctionnant toujours simultanément avec une dépense absolument constante. Mais l'emploi du compteur de temps exige que la compagnie d'éclairage exerce un contrôle incessant sur l'installation intérieure de l'abonné, et qu'aucun changement n'y soit apporté sans son consentement.

Le compteur de temps le plus connu et le plus employé est celui de M. A. Aubert. Il renferme un mouvement d'horlogerie marchant 200 heures et actionnant trois roues indiquant par trois cadrans les unités, les dizaines et les centaines d'heures.

Un électro-aimant sert de déclencheur. Au moment où l'on ferme le circuit, l'armature de l'électro est attirée et déclenche le balancier de la pendule qui se met en marche et indique en minutes, heures, dizaines et centaines d'heures le temps exact pendant lequel le courant a passé. Dès qu'on interrompt le circuit, l'armature, sollicitée par un ressort, reprend sa position première et le mouvement de la pendule s'arrête.

MESURE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

113. Dynamomètres. — La mesure de l'énergie mécanique se fait au moyen des dynamomètres. Ces appareils peuvent se diviser en deux classes :

1° Les dynamomètres d'*absorption*, qui absorbent le travail total du moteur et le mesurent en substituant au travail des outils celui d'une résistance facile à évaluer.

Dans ce cas, on supprime un moment l'outil et on le remplace

par le dynamomètre. Si la vitesse reste la même, on peut admettre que le travail absorbé par le dynamomètre est égal à celui consommé par l'outil.

2° Les dynamomètres de *transmission* qui, intercalés entre le moteur et l'outil, communiquent à celui-ci le mouvement par l'intermédiaire d'organes dont les tensions ou les déformations peuvent être observées ou enregistrées et font connaître le travail transmis.

Ces derniers appareils sont plutôt destinés à mesurer le travail fourni à un outil. Les autres, au contraire, permettent d'étudier la marche du moteur.

Les systèmes de dynamomètres sont assez nombreux et restent plutôt dans le domaine de la mécanique que dans celui de l'électricité. Nous renvoyons donc nos lecteurs aux ouvrages spéciaux.

114. Frein de Prony. — Nous décrirons cependant le frein de Prony, qui est le type le plus simple et le plus répandu des dyna-

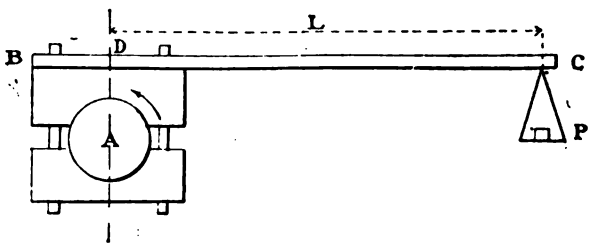


Fig. 54.

momètres d'absorption et qui présente l'avantage de pouvoir être installé dans les usines par un simple ouvrier.

On entoure l'arbre A de la machine (fig. 54) de deux plateaux en bois, pressés contre sa surface par deux boulons qui les traversent de part en part. Au plateau supérieur est fixé un levier BC à l'extrémité duquel on peut suspendre des poids. Le frottement des plateaux contre l'arbre tend à communiquer au levier un mouvement de rotation qui est équilibré par le poids placé à l'extrémité C.

Soient L la longueur du bras de levier DC et n le nombre de tours de l'arbre par minute ; soit P le poids placé en C plus le poids du

bras de levier réduit à la longueur L ; le travail en kilogrammètres est par seconde :

$$T = \frac{2 \pi L n P}{60}.$$

Pour éviter les calculs relatifs au poids du bras de levier, on fait ce bras aussi léger que possible, on le prolonge un peu en B et on l'équilibre par un contrepoids.

Enfin, pour empêcher de trop grandes oscillations en C, on dispose en haut et en bas deux taquets qui limitent la course du levier.

Il faut avoir soin, pendant l'expérience, de mouiller avec de l'eau de savon la surface de contact de l'arbre et des plateaux pour éviter l'échauffement.

115. Compteurs de tours. — Dans la mesure du travail mécanique, on a toujours besoin de déterminer la vitesse de rotation de la machine. On l'obtient avec des appareils appelés compteurs de tours, qui font connaître le nombre de tours exécutés pendant un temps donné. Le compteur ou vélocimètre de M. Deschiens est un des instruments les plus commodes pour cet usage.

Lorsque la vitesse est inférieure à 100 tours par minute, on peut l'évaluer directement en suivant de l'œil une des parties tournantes de la machine, sur laquelle on a fait préalablement une marque visible.

MESURES PHOTOMÉTRIQUES

L'application de l'électricité à l'éclairage impose aux électriciens la connaissance de la photométrie. Malheureusement, nous devons constater que cette science n'a pas suivi l'électricité dans ses progrès. La photométrie *industrielle* n'existe pas encore, et les électriciens en sont réduits à se servir dans leurs ateliers des procédés qui ont été imaginés pour les laboratoires. Il y a là une grande lacune à combler ; mais il est difficile jusqu'à présent d'entrevoir la solution de ce problème qui intéresse tant l'électricité.

Nous allons donc nous contenter d'énoncer les principes sur lesquels on s'appuie et les procédés les plus employés par les constructeurs de lampes électriques, malgré leurs imperfections.

116. Définitions. — 1° Deux sources lumineuses ont des intensités égales quand, placées de la même manière par rapport à une même surface, elles l'éclairent de la même façon, c'est-à-dire quand elles produisent sur notre œil la même sensation lumineuse.

2° L'intensité d'une source lumineuse I est double, triple, etc..., de celle d'une source I′ quand elle produit sur une même surface le même éclairement que 2, 3, etc..., sources égales à I′ et placées de la même façon.

3° Si l'on change la distance d'une source lumineuse à la surface éclairée, les quantités de lumière reçues par la même surface sont inversement proportionnelles aux carrés des distances de la source à la surface.

4° Si deux sources lumineuses S et S′, ayant des intensités I et I′ et placées à des distances d et d' d'une même surface, produisent le même éclairement, les intensités sont proportionnelles aux carrés des distances, c'est-à-dire qu'on a l'égalité :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}. \qquad (1)$$

En effet, l'éclairement produit par la source S est proportionnel à son intensité et inversement proportionnel au carré de sa distance à la surface; il est égal à $\frac{I}{d^2}$. De même l'éclairement produit par la source S′ est égal à $\frac{I'}{d'^2}$.

Ces deux éclairements étant égaux entre eux, on a :

$$\frac{I}{d^2} = \frac{I'}{d'^2} \quad \text{ou} \quad \frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}.$$

Les appareils photométriques sont tous basés sur les lois que nous venons d'énoncer. Pour comparer deux lumières, on compare les éclairements qu'elles produisent sur un même écran. Mais comme il est très difficile de juger du rapport qui existe entre deux sensations lumineuses différentes, on s'arrange pour que ces sensations soient pareilles, ce qui est plus facile à reconnaître. On

fait donc varier les distances des lumières à l'écran de façon à avoir le même éclairement, et la loi des distances permet de calculer les intensités lumineuses.

117. Photomètre de Bouguer. — Cet appareil (fig. 55) se compose d'un cadre en bois M N auquel est adapté un écran transparent *abcd* en papier simple ou en verre dépoli. Une cloison opaque P Q,

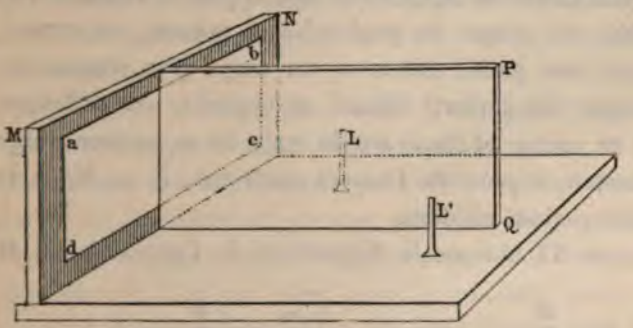


Fig. 55.

placée perpendiculairement à cet écran, le divise en deux parties égales. Dans chaque compartiment ainsi formé on place une des lumières que l'on veut comparer L, L'. En éloignant plus ou moins l'une ou l'autre, on produit le même éclairement de l'écran. Si l'on mesure la distance des deux sources lumineuses à l'écran MN et qu'on applique la formule (1), on obtient le rapport qui existe entre les deux intensités lumineuses.

118. Photomètre de Foucault. — L'appareil de Bouguer a l'inconvénient de donner entre les deux surfaces éclairées une ligne d'ombre produite par le bord de la cloison centrale, ce qui rend plus difficile l'appréciation de l'égalité d'éclairement. Pour y obvier, Foucault a disposé la cloison opaque (fig. 56) de manière qu'elle puisse s'éloigner ou s'approcher de l'écran. Il existe ainsi entre l'écran et la cloison un espace vide que l'on peut faire varier à volonté ; ce mouvement est obtenu

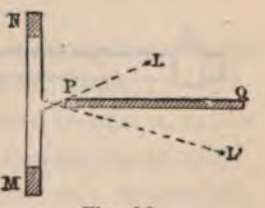


Fig. 56.

par une vis de rappel manœuvrée à la main. Quand on fait une mesure, on imprime un mouvement à cette vis jusqu'à ce que la

bande noire formée par l'ombre de la cloison ait complètement disparu.

Les deux surfaces de l'écran sont alors éclairées d'une façon analogue, et les distances des sources lumineuses à l'écran permettent d'en calculer les intensités.

119. Photomètre de Bunsen. — Cet appareil consiste essentiellement dans un disque de papier blanc poreux, au centre duquel on a tracé une petite raie avec un corps gras comme la cire ou la stéarine. Ce papier, éclairé et regardé par réflexion, paraît sombre au centre et blanc sur le reste de sa surface. Regardé par transparence, il présente l'aspect contraire ; il est blanc au centre et sombre partout ailleurs.

La figure 57 indique la disposition de l'appareil. Le disque de

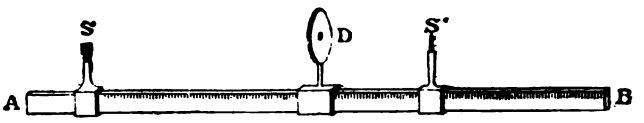


Fig. 57.

papier D est porté par un curseur qui peut se déplacer le long d'une règle divisée AB. De chaque côté du disque on met les deux sources lumineuses S,S' à comparer, et l'on déplace le disque jusqu'à ce que son centre soit également éclairé sur ses deux faces et que la raie sombre ait complètement disparu.

120. — Cet appareil a reçu la modification suivante, qui en rend l'emploi plus commode. L'écran AB (fig. 58), dont le centre

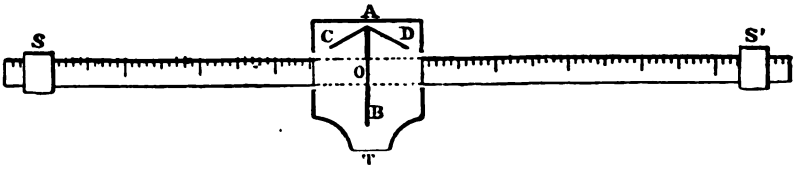


Fig. 58.

O est éclairé par les sources S et S', est placé dans l'angle de deux miroirs AC, AD, et ce sont les images du point O dans ces miroirs que regarde l'observateur placé en T. Le tout est contenu

dans une petite boîte percée de deux ouvertures latérales par lesquelles pénètrent les rayons lumineux. En avant est un trou T par lequel regarde l'observateur. La boîte glisse sur une règle divisée. Les sources lumineuses sont fixées en S et S'.

Pour faire une observation, on fait avancer la boîte à droite ou à gauche jusqu'à ce que l'éclairement soit le même des deux côtés. On lit alors les deux longueurs indiquées sur la règle pour les distances des points lumineux et l'on calcule les intensités comme précédemment.

Cet appareil est d'un usage très facile. Il est assez employé par les fabricants de lampes à incandescence. Dans ce cas, il est bon d'avoir une lampe à incandescence dont la puissance lumineuse a été déterminée d'avance et qui sert de type. On la place en S à poste fixe et l'on dispose en S' la lampe que l'on veut essayer. Il est plus simple d'opérer ainsi que de recourir pour chaque expérience à la bougie étalon dont les indications sont souvent défectueuses, à cause des irrégularités de la mèche, ou à la lampe Carcel dont la manœuvre n'est pas très commode.

121. Mesure des foyers électriques puissants. — La comparaison des pouvoirs éclairants de deux sources lumineuses, assez simple à faire lorsqu'elles ont à peu près la même valeur, devient fort difficile quand leurs intensités sont très différentes. C'est ce qui se présente, par exemple, dans le cas où l'on veut comparer la lumière d'une bougie étalon avec celle d'un puissant régulateur à arc électrique. On a dû recourir à différents artifices ; l'un d'eux consiste à comparer la lumière étalon à une source un peu plus plus forte, puis celle-ci à une troisième, et ainsi de suite, en augmentant à chaque fois l'intensité du foyer.

C'est de cette manière qu'ont été faites les expériences du Comité de Munich à l'Exposition d'électricité de cette ville, en 1882. Dans ces expériences, la source étalon était une bougie normale anglaise de spermaceti ayant une hauteur de flamme de 45 millimètres. Pour mesurer la valeur d'un foyer à arc, on a successivement comparé : 1° la bougie anglaise à un bec de gaz ayant un trou de 1 millimètre d'ouverture alimenté par un compteur d'une bougie ; 2° ce bec à un bec Argand alimenté par un compteur de

16 bougies ; 3° ce bec Argand à un bec intensif Siemens alimenté par un compteur de 30 becs ; 4° enfin, ce bec intensif à la lampe électrique à arc. La valeur de cette lampe à arc par rapport à la bougie type se déduisait de l'ensemble de ces différentes expériences.

122. Mesure de l'intensité lumineuse émise sous différents angles. — La mesure de l'intensité lumineuse des foyers électriques à arc présente une autre difficulté. Cette intensité varie, en effet, dans des proportions assez considérables suivant l'angle sous lequel

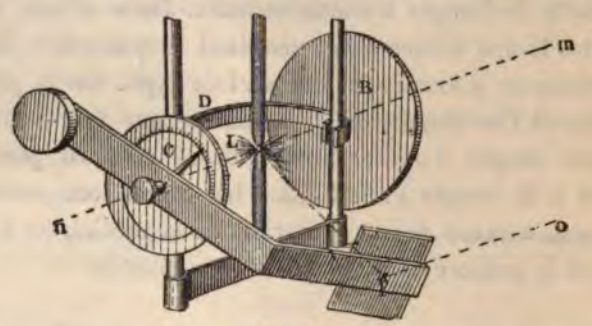


Fig. 59.

sont émis les rayons lumineux. Cela tient à la façon dont brûlent les charbons de la lampe électrique ; le charbon supérieur forme, pour ainsi dire, un réflecteur qui renvoie principalement la lumière dans l'espace compris entre 45° et 60° au-dessous du plan horizontal passant par l'arc ; il est donc utile de pouvoir prendre des mesures sous différents angles, pour se rendre compte de la quantité de lumière qu'on obtient réellement. Cette mesure peut se faire avec l'appareil suivant construit par MM. Siemens et Halske.

Sur les deux montants du porte-charbon inférieur (fig. 59), on fixe une tige métallique horizontale D qui porte un bras coudé servant de support à un miroir *p*. Ce bras peut tourner autour d'un axe situé à la hauteur de l'arc électrique, en entraînant un index qui indique sur un cadran C l'angle fait par le miroir avec l'horizontale.

Les rayons qui doivent tomber sur le photomètre sont réfléchis

par le miroir suivant l'angle L*po*, qui est droit d'après la construction de l'appareil. Enfin, un écran opaque B empêche les rayons d'arriver directement sur le photomètre.

Lorsqu'on emploie cet instrument, on ne doit pas oublier que le miroir absorbe une certaine quantité de lumière ; il faut donc déterminer son coefficient d'absorption. On y arrive en faisant une première mesure avec l'appareil que nous venons de décrire, le miroir étant dans le même plan horizontal que l'arc électrique. On envoie ensuite directement les rayons sur le photomètre en tournant la lampe de 90° autour de son axe vertical. Le rapport des deux intensités observées donne le coefficient cherché.

123. Mesure de l'éclairement. — Les appareils que nous venons d'étudier servent à la comparaison des foyers et donnent l'inten-

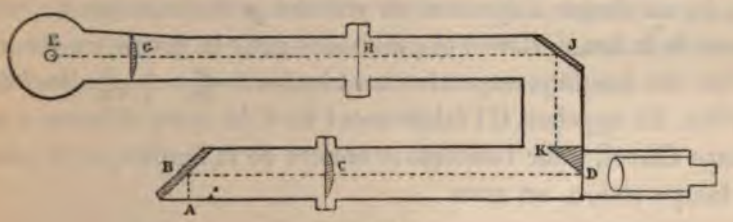


Fig. 60.

sité lumineuse. Mais, ainsi que nous l'avons vu, cette intensité n'est pas le seul élément dont on ait à se préoccuper ; il faut aussi tenir compte de l'éclairement qui a une très grande importance dans les installations d'éclairage. Cet éclairement peut se mesurer au moyen du photomètre de M. Mascart (fig. 60).

L'appareil se compose essentiellement de deux tubes recevant l'un la lumière à étudier, l'autre la lumière d'une source de comparaison. Pour faire l'expérience, on le dispose de façon que l'écran de Foucault A se trouve au point dont on veut déterminer l'éclairement. La lumière tombe sur cet écran, le traverse, se réfléchit sur une glace B, et vient tomber sur une lentille C contre laquelle se trouve un diaphragme à volets mobiles, permettant d'augmenter ou de diminuer la surface éclairée. On obtient ainsi en D une image de l'écran A.

A l'extrémité de l'autre tube se trouve une lampe étalon à huile E

dont on a réglé avec soin la hauteur de la flamme et par suite l'intensité lumineuse. Cette lampe envoie un faisceau de lumière qui est concentré par une lentille G sur un écran de Foucault H de même surface que l'écran A ; ce faisceau arrive ensuite sur une lentille munie d'un second diaphragme à volets mobiles, puis sur la glace J, où elle se réfléchit, et enfin dans le prisme K, qui la renvoie en D.

On a ainsi sur l'écran D les quantités de lumière émises par les deux sources, chacune des sources occupant la moitié du disque. Il suffit alors d'amener l'égalité d'éclat des deux parties en agissant sur les volets mobiles des diaphragmes.

La graduation de l'appareil se fait avec une lampe Carcel type placée à 1 mètre de l'écran. Supposons que les échelles des volets soient divisées en 100 parties. On obtiendra, par exemple, l'égalité d'éclat du disque d'épreuve en prenant p divisions pour l'éclairement de la lampe Carcel et q divisions pour la lampe témoin, c'est-à-dire des fractions respectivement égales à $\frac{p}{100}$ et $\frac{q}{100}$ de chacune d'elles. En appelant C l'éclairement final du verre d'épreuve par la lampe Carcel, pour l'ouverture entière de la lentille, et T celui de la lampe étalon, on aura

$$C\frac{p}{100} = T\frac{q}{100} \qquad \text{ou} \qquad C = \frac{q}{p}T.$$

Le rapport $\frac{q}{p}$ ainsi déterminé pour chaque appareil est une constante m qui définit l'éclairage équivalent à une lampe Carcel à 1 mètre.

L'appareil une fois gradué, il suffit, pour avoir un éclairement cherché, de lire les divisions p' et q' correspondant à l'égalité d'éclat des deux disques. Cet éclairement est de 1, 2, 3... carcels, suivant que la valeur de $\frac{q'}{p'}$ est égale à m, $2m$, $3m$...

Le photomètre de M. Mascart est donc d'un emploi assez simple. Le modèle principal, construit par M. Pellin, a environ 1 mètre de longueur ; il est monté horizontalement sur un trépied qui permet de le placer dans tous les azimuts. En outre, l'écran tourne avec son miroir, de sorte qu'on peut recevoir la lumière dans une direction quelconque.

124. — Les méthodes de mesures photométriques exigent de nombreuses précautions sur lesquelles nous ne pouvons insister. Ainsi, suivant que telle ou telle partie de la flamme est exposée devant les diaphragmes, les résultats des mesures se trouvent modifiés. Il peut arriver aussi, quand on compare un foyer à une lampe Carcel, par exemple, que les deux sources lumineuses n'aient pas la même couleur ; l'opération est alors plus difficile. Enfin, lorsque la lampe ne brûle pas à l'air nu et est entourée d'un globe, ce dernier modifie non seulement l'intensité lumineuse, mais encore les variations de cette intensité suivant l'angle d'émission des rayons.

Ces difficultés, et bien d'autres encore que nous sommes obligés de passer sous silence, nécessitent autant de modifications aux méthodes précédentes. Nous ne pouvons entrer dans le détail complet des opérations auxquelles elles donnent lieu ; une semblable description nous entraînerait beaucoup trop loin. Nous avons dû nous contenter d'exposer les principes des mesures photométriques et les appareils les plus fréquemment employés.

DEUXIÈME PARTIE

APPAREILS PRODUCTEURS DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

PILES

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

La production d'un courant électrique exige toujours une dépense de travail, soit sous forme de chaleur ou de réactions chimiques, soit en énergie mécanique. Il résulte de là qu'il existe trois sortes d'appareils pour produire l'électricité : les uns utilisant les actions chimiques, les autres se servant directement de la chaleur, enfin la troisième classe transformant en courant électrique le travail d'un moteur. Nous allons passer ces appareils en revue et examiner les applications que l'industrie peut en faire.

125. Théorie de la pile. — Si dans de l'eau contenant de l'acide sulfurique on plonge une lame de zinc parfaitement pur, on obtient un dégagement d'hydrogène presque insensible. Mais si l'on ajoute dans ce liquide une lame de platine et qu'on amène les deux métaux au contact en un point quelconque de leurs surfaces, il se produit immédiatement une action très vive et un dégagement gazeux abondant sur le platine. Si l'on sépare les deux métaux, l'action s'arrête.

Au lieu d'établir le contact directement, on peut le produire par un fil métallique d'une longueur quelconque ; le dégagement recommence et, si l'on approche du fil une aiguille aimantée, on observe qu'elle est déviée de sa position d'équilibre. D'après les considérations que nous avons exposées au début de cet ouvrage, on peut dire qu'un courant électrique a pris naissance. Volta attribuait la production de ce courant au contact des deux métaux ; mais il est reconnu maintenant que ce phénomène est dû aux actions chimiques qui se produisent dans l'appareil. Voici comment on peut l'expliquer :

L'eau se trouve décomposée parce que l'affinité de l'oxygène pour le zinc est plus grande que pour l'hydrogène : l'oxygène se porte donc sur le zinc avec lequel il forme un oxyde, cet oxyde se combine lui-même avec l'acide sulfurique pour donner un sulfate, et l'hydrogène vient se dégager sur le platine.

Soit une molécule d'eau HO ; elle est en équilibre sous l'action de l'affinité réciproque de l'oxygène et de l'hydrogène f. Si l'on ajoute du zinc et de l'acide sulfurique, l'équilibre est détruit. Soient F l'affinité du zinc pour l'oxygène et a l'affinité de l'acide sulfurique pour l'oxyde de zinc. L'oxygène est attiré par le zinc avec une force $F + a - f$. La molécule de zinc est animée d'une force égale et de sens contraire. Les deux molécules sont donc attirées l'une vers l'autre ; lorsqu'elles sont au contact, les forces qui les animent se détruisent mutuellement, et un nouvel état d'équilibre s'établit.

Mais l'hydrogène qui a été mis en liberté est sollicité par une force égale et contraire à celle qui animait l'oxygène. Cette action n'est neutralisée par aucune force opposée, puisque le platine et l'hydrogène n'ont pas d'affinité réciproque et qu'ils ne peuvent se combiner. Cette force est considérable, comme nous le verrons plus tard. Il faut absolument qu'elle agisse, qu'elle produise un travail quelconque.

C'est elle qui se transforme en électricité, de même que nous voyons, dans certaines circonstances, les forces se changer en chaleur. Comment se fait cette transformation? Nous ne devons pas chercher à l'expliquer, pas plus qu'on explique la production de la chaleur et de la lumière. Nous voyons seulement sous quelle

influence elle prend naissance ; et chaque fois que nous nous placerons dans des conditions semblables, c'est-à-dire quand, par suite de phénomènes chimiques, nous donnerons naissance à une réaction qui ne sera pas équilibrée par une force égale, dans un appareil disposé comme celui que nous venons de décrire, nous produirons une force spéciale, que nous nommons *force électromotrice* et qui est proportionnelle aux affinités des corps mis en présence.

En remplaçant le platine par du cuivre ou par un autre métal moins oxydable que le zinc, du plomb ou du fer, par exemple, on observerait une action analogue, quoique moins énergique.

Une objection se présente tout naturellement :

Comment se fait-il que, quand on opère sur des réactifs parfaitement purs, la fermeture du circuit est nécessaire pour qu'on constate une réaction chimique ? Lorsque le circuit est ouvert, les corps peuvent rester en présence comme des matières inertes, sans qu'on observe le moindre travail chimique. Au contraire, dès qu'il est fermé, l'action s'accuse très nettement et il se produit aussitôt un dégagement de gaz abondant.

Il faut remarquer que les faits ne se passent pas précisément comme les apparences semblent l'indiquer. Quand on place du zinc et du cuivre en présence l'un de l'autre dans l'eau acidulée, sans les réunir par un conducteur extérieur, il y a toujours réaction chimique et production d'électricité ; et la preuve, c'est que, si l'on met ces métaux en communication avec les armatures d'un condensateur, on charge cet appareil. Mais l'action de la pile s'arrête instantanément parce que chaque métal prend immédiatement le potentiel qui lui est propre. Si, au contraire, on ferme le circuit, les deux métaux se trouvant à des potentiels différents, il doit se produire un courant qui persistera toujours parce que les potentiels ne seront jamais égaux, et un régime s'établit qui dépend des affinités des corps mis en présence, de la résistance de la pile et de celle du circuit. Chaque pile prend donc une certaine marche suivant les conditions où elle est placée, de même qu'un moteur prend une allure pour chaque somme de travail qu'il a à vaincre.

Si nous considérons un moteur, nous voyons sa vitesse augmenter

à chaque tour par suite de la vitesse acquise, jusqu'à une certaine limite où, le travail moteur étant égal au travail résistant, la marche devient uniforme. La même chose se passe dans la pile, mais avec une telle rapidité, qu'on ne peut séparer les différentes phases de l'opération et que l'action semble instantanée.

L'appareil que nous venons de décrire est un *élément* de pile. L'accouplement de plusieurs éléments forme une *batterie*. Les *électrodes* sont les deux lames qui baignent dans le liquide.

On appelle *conducteurs* les fils qui réunissent extérieurement les électrodes. L'ensemble des conducteurs et de la pile constitue le *circuit ;* on dit qu'il est *fermé* quand il n'offre aucune solution de continuité ; il est *ouvert* dans le cas contraire.

Les parties extérieures des électrodes auxquelles viennent s'attacher les conducteurs sont les *pôles* de la pile.

Pour simplifier le raisonnement, on est convenu d'adopter un certain sens pour le courant, et l'on suppose qu'il marche du pôle positif, qui est le platine, au pôle négatif, qui est le zinc, à travers le conducteur, et du pôle négatif au positif, dans l'intérieur de la pile.

L'action du zinc sur l'eau acidulée n'est pas la seule qui produise un courant électrique. On l'obtient encore par d'autres réactions chimiques.

Ainsi, dans une dissolution de sulfate de cuivre, plaçons une lame de fer et une lame de platine reliées entre elles par un fil métallique. Le fer sera attaqué et s'oxydera ; le sulfate de cuivre sera décomposé, et le cuivre de ce sulfate se précipitera à l'état métallique sur la plaque de platine, tandis qu'il se produira du sulfate de fer dans la dissolution. On verra en même temps un courant aller du platine au fer à travers le conducteur. Il y a donc formation d'une pile dont le fer est le pôle négatif.

Si l'on prend deux fils d'or et qu'on les plonge dans l'acide azotique, on ne voit aucun phénomène électrique parce que l'or n'est pas attaqué. Mais ajoutons un peu d'acide chlorhydrique auprès d'un des fils seulement, nous formerons près de ce fil de l'eau régale qui l'attaquera et produira un courant allant du fil non attaqué au fil attaqué.

Si l'on fait un couple avec du zinc et du cadmium, on obtient

encore une pile dans laquelle le cadmium est attaqué et forme le pôle négatif.

On pourrait citer une grande quantité de faits du même genre. En résumé, *si l'on plonge deux corps métalliques reliés l'un à l'autre par un conducteur, dans une liqueur qui ait de l'affinité pour l'un d'eux, on produit un courant électrique et c'est le corps attaqué qui constitue le pôle négatif.*

Comme nous le ferons remarquer plus tard, dans la construction des piles, on choisit ordinairement le zinc pour le pôle négatif. C'est parce que ce métal ne coûte pas cher, qu'il est vigoureusement attaqué par les acides et qu'on peut l'avoir à peu près pur sans trop de difficultés.

126. Résistance intérieure d'une pile. — Nous avons vu comment les réactions chimiques qui se passent dans une pile donnent nais-

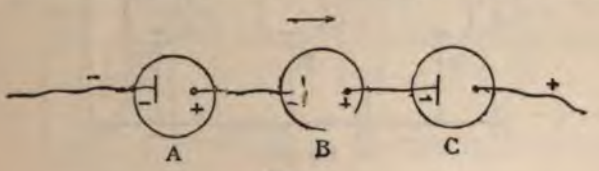


Fig. 61.

sance à un courant. Ce courant peut être employé à produire un travail quelconque, soit chimique, soit calorifique, soit électrique. Mais il en est des piles comme de toutes les machines : le travail utilisable qu'elles développent n'est pas absolument égal à celui qu'elles dépensent, et elles ont un certain rendement qui dépend de leur construction.

Les liquides qui composent l'élément, les métaux qui servent d'électrodes opposent au passage de l'électricité une certaine résistance *intérieure*, dont nous avons déjà parlé et sur laquelle nous reviendrons en étudiant les différents systèmes de piles.

127. Accouplement des piles. — Quand on relie ensemble plusieurs éléments identiques de pile A, B, C, de telle façon que le pôle positif de l'un soit rattaché au pôle négatif de l'autre, comme l'indique la figure 61, ces éléments sont dits réunis en *tension* ou

en *série*. L'expérience démontre que la force électromotrice augmente proportionnellement au nombre des éléments, ainsi que la résistance intérieure. Dans le cas actuel, par exemple, la force électromotrice d'un élément étant *e*, les trois éléments accouplés donneront 3 *e*.

Voici comment nous pouvons nous rendre compte de ce phénomène :

Nous avons vu que les réactions chimiques produisaient dans la pile A une force *e* dirigée suivant la flèche. Si nous unissons les 2 éléments A et B, que nous supposons identiques, la force *e* de A viendra s'ajouter à celle qui se développe entre les pôles de B, et qui est elle-même égale à *e*. Entre les 2 éléments B et C nous

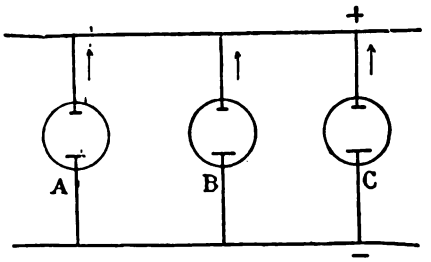


Fig. 62.

aurons donc une force égale à 2 *e*. Cette force vient encore s'ajouter à celle qui se produit en C; nous aurons donc finalement sur le conducteur extérieur une force égale à 3 *e*. C'est la force électromotrice totale de la pile, et elle est la résultante des diverses actions qui se passent dans chaque élément.

Si, au lieu d'accoupler les éléments de cette façon, on relie d'un côté tous les pôles positifs, et de l'autre tous les pôles négatifs des 3 éléments (fig. 62), on dit qu'ils sont réunis en *quantité* ou en *dérivation*, et l'effet est différent. Comme le prouve l'expérience, le résultat est identique à celui qu'on obtiendrait en prenant un seul élément d'une surface trois fois plus grande ; la résistance intérieure est trois fois plus petite, mais la force électromotrice ne change pas et reste égale à celle d'un seul élément.

128. — Ces phénomènes de tension et de quantité peuvent être

rendus sensibles de la façon suivante, qui permet en quelque sorte de les représenter :

Supposons trois corps de pompe de même diamètre munis chacun d'un piston de surface s, et communiquant entre eux, comme l'indique la figure 63. Si, sur tous les pistons à la fois, on exerce mécaniquement la pression p par unité de surface, la pression sera

en A	$1\ p$,
en B	$2\ p$,
en C	$3\ p$,

et en un point quelconque du tuyau de sortie T, on aura une pression $3\ p$.

Au lieu d'accoupler les pompes comme nous venons de le faire,

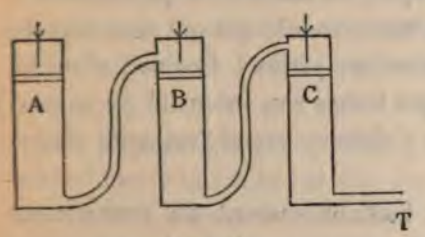


Fig. 63.

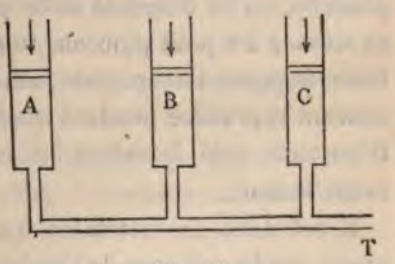


Fig. 64.

adoptons maintenant la disposition représentée figure 64 ; nous aurons la même pression p en A, B, C, ainsi que dans le tuyau T.

Si nous faisons parcourir aux pistons la même course c, dans le premier cas le travail sera $3\ p \times (sc)$; dans le second cas $3\ (sc) \times p$.

Avec la première disposition, c'est la pression qui est multipliée par le nombre de pistons : avec la seconde disposition, c'est la surface. Il y a là quelque chose d'analogue à ce qu'on appelle tension et quantité dans les batteries.

129. Polarisation. — La force électromotrice d'une pile étant le résultat des réactions chimiques qui se passent dans l'intérieur du liquide, tant que ces réactions seront constantes, la pile ne variera pas. Au contraire, si l'intervention de quelque phénomène étranger

vient modifier les affinités en jeu, la force électromotrice en subira les conséquences. Dans la pile zinc-platine, que nous avons déjà décrite, il se produit un fait de cette nature.

On voit en effet le courant diminuer très sensiblement quelques secondes après la fermeture du circuit. L'affaiblissement est rapide si le circuit offre peu de résistance ; il est lent dans le cas contraire.

Si, après que le courant a circulé quelque temps, on l'interrompt et qu'on laisse reposer la pile, on voit, en fermant de nouveau le circuit, le courant reprendre sa force première, qui recommence ensuite à diminuer peu à peu.

Ce phénomène est dû à la présence de l'hydrogène sur le platine. On peut s'en assurer en agitant le liquide près de la plaque positive, ou en remuant cette plaque, ou encore en promenant à sa surface un petit pinceau, tous mouvements qui ont pour but de faire dégager l'hydrogène adhérent au platine. On voit alors le courant reprendre pendant quelque temps son intensité première. D'un autre côté, le même fait ne s'observe pas si l'on agite seulement le zinc.

Il est donc incontestable que l'affaiblissement du courant est causé par la présence de l'hydrogène. Ce gaz agit de deux façons : d'abord il offre une résistance au courant à cause de son manque de conductibilité, et diminue la surface active de la plaque de platine. Ensuite, il exerce sur la pile une action toute particulière ; par son affinité pour l'oxygène, il s'oppose à la décomposition de l'eau. C'est une force contraire à celle qui agit dans la pile, et elle tend à recombiner les éléments que l'action chimique a séparés Par suite, un courant se forme en sens contraire du premier dont la valeur se trouve diminuée.

Ce fait est mis en évidence de la manière suivante : lorsque deux lames de platine ont servi d'électrodes pour la décomposition de l'eau dans un voltamètre, et, qu'après avoir interrompu la communication avec la source d'électricité, on réunit ces lames par un fil sur lequel on place un galvanomètre, on constate la production d'un courant dirigé en sens contraire du premier. Ce courant n'a du reste qu'une durée fort courte.

On peut encore démontrer d'une autre façon les propriétés

acquises par l'électrode positive *l* d'une pile affaiblie. Si dans le liquide on place une autre lame de même métal *l'*, et si l'on joint ces deux lames par un conducteur, on constate, au moyen du galvanomètre, qu'un courant passe et que la lame *l* se comporte comme électrode négative par rapport à *l'*. Ainsi *l* qui était électro-positive dans le couple voltaïque, est devenue électro-négative dans le nouveau couple à deux anodes de même métal. Le courant va d'ailleurs en diminuant et bientôt il devient insensible.

Ce phénomène a reçu le nom de *polarisation*. On appelle courant *secondaire* ou de *polarisation* celui qui a pris naissance dans la seconde expérience, et l'on dit que les électrodes sont *polarisées*.

Ce qui précède montre comment les courants de polarisation se forment. Nous verrons plus tard que ce phénomène a été utilisé et a servi de base aux piles secondaires ou accumulateurs.

130. Dépolarisation des piles. — La polarisation des électrodes influe beaucoup sur la marche des piles et constitue un grand obstacle à leur constance; aussi a-t-on essayé des moyens de toutes sortes pour combattre cet effet. Le remède qui se présente naturellement est d'éliminer le gaz au fur et à mesure de sa formation. Plusieurs procédés peuvent être employés dans ce but. L'un d'eux, imaginé par M. Smee, consiste à prendre une électrode en platine recouverte d'une couche de platine pulvérulent déposé par l'électricité. La surface ainsi préparée permet aux bulles d'hydrogène de se dégager bien mieux que sur une surface polie. Pour diminuer le prix de la pile, M. Smee s'est aussi servi d'argent platiné, ou de cuivre revêtu par électrolyse, d'abord d'argent, puis de platine. Enfin, M. Walker a eu recours à des électrodes en charbon de cornue platiné; cette dernière solution a été assez heureusement employée par M. Maiche, ainsi que nous le verrons plus loin.

On a aussi cherché à combattre la polarisation par des moyens mécaniques. C'est ainsi que M. Erckmann a imaginé des éléments ayant une forme circulaire et montés sur un axe de rotation commun. Les couples immergés jusqu'au niveau de l'axe viennent

baigner dans le liquide d'une façon successive, et les surfaces métalliques en sortant du bain sont soumises à l'action d'un brosse qui les débarrasse des bulles de gaz.

Bien d'autres essais ont été faits pour la dépolarisation des piles; mais c'est la chimie qui a donné la solution pratique de ce problème. Pour chasser l'hydrogène, le moyen le plus sûr est de l'absorber dans une combinaison chimique.

Si l'on prend, par exemple, un élément zinc-platine et qu'on le laisse marcher pendant quelques minutes, on voit, comme nous l'avons déjà dit, le courant diminuer. Mais si l'on verse autour du platine quelques gouttes d'acide azotique, le courant reprend son intensité première. C'est que l'acide azotique, qui est un oxydant énergique, s'est emparé de l'hydrogène en formant de l'eau et un oxyde d'azote. L'influence de l'hydrogène a donc été neutralisée.

Si, au lieu de verser l'acide azotique directement dans la liqueur, on l'en sépare par une cloison poreuse et qu'on mette l'électrode positive, non plus dans l'eau acidulée, mais bien dans l'acide azotique, le même effet se produit d'une façon bien plus remarquable. C'est là le principe des piles dites *à deux liquides*.

Il s'agit donc, pour éviter la polarisation, de composer l'élément avec deux liquides séparés l'un de l'autre : le premier contient le pôle zinc et est destiné à attaquer ce métal ; le second, qui renferme le pôle positif, sert à former avec l'hydrogène une combinaison qui reste en dissolution dans la liqueur.

Dans d'autres cas, au contraire, on a voulu éviter l'emploi de deux liquides différents, et l'on s'est servi d'une solution qui produit à la fois l'oxydation du zinc et l'absorption de l'hydrogène. Pour effectuer cette dernière, on se sert de chlorures et d'oxydes facilement décomposables.

On a essayé les réactions et les dispositions les plus variées. Nous examinerons plus loin les systèmes généralement adoptés.

131. Amalgamation des zincs. — Quand on répète avec du zinc impur du commerce l'expérience que nous avons citée plus haut, et qu'on le plonge avec une lame de platine dans de l'eau acidulée, sans réunir ces deux métaux, une action très vive a immédiatement lieu ; le zinc se dissout et il se dégage de l'hydrogène.

Nous avons vu que cette action ne se produisait pas avec du zinc pur, et que la fermeture du circuit était alors nécessaire. Kemp a reconnu que le zinc impur amalgamé jouait à peu près le même rôle que le métal pur; il n'est attaqué par le liquide que quand le circuit électrique est fermé.

L'attaque du zinc impur s'explique en admettant qu'il se forme sur le métal une foule de couples locaux entre le zinc et les impuretés qu'il contient. Le mercure a pour effet d'empêcher la formation de ces éléments voltaïques. On y a recours parce que l'amalgamation est facile et économique à produire, tandis que le zinc pur coûte cher.

Grâce à ce perfectionnement, la pile ne s'use pas sensiblement quand le circuit est ouvert; on peut donc réaliser une grande économie sur la dépense et, en outre, la force électromotrice paraît un peu augmentée.

Pour amalgamer les zincs, on verse dans un vase plat de l'eau contenant un dixième d'acide sulfurique en volume et du mercure. Puis, on frotte le métal avec une brosse en fils de cuivre jusqu'à ce que toute la surface soit brillante.

On emploie encore le procédé suivant : on passe d'abord les zincs dans une solution de potasse pendant quelques minutes, pour les dégraisser, puis on les plonge pendant dix à quinze secondes dans un liquide formé comme il suit :

Bisulfite de mercure.	100	grammes.
Eau	900	—
Acide sulfurique.	150 à 200	—

Le bisulfite doit être au préalable dissous dans l'eau acidulée. On retire les zincs et on les frotte de façon que les surfaces deviennent brillantes. On répète au besoin l'opération une seconde fois. La même solution peut servir de nouveau en remplaçant simplement le liquide enlevé.

Enfin un troisième procédé, plus simple que les précédents, consiste à plonger les zincs dans un liquide composé d'acide sulfurique, d'acide chlorhydrique et d'une dissolution de bichromate de potasse, puis dans du mercure. Il est complètement inutile, dans ce cas, de frotter les zincs.

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE PILES

132. Pile de Volta. — Rappelons en quelques mots la disposition de la pile de Volta. C'est une série de rondelles de zinc et de cuivre superposées et séparées par des couches de drap imbibé d'eau acidulée. Les éléments sont empilés verticalement. Pour fermer le circuit, on soude un fil de cuivre à chacun des disques métalliques extrêmes.

Cette pile tout à fait rudimentaire n'était susceptible d'aucune application. Il était très difficile de l'entretenir en état de propreté et de maintenir les rondelles de drap toujours humides. Il s'établissait, par le liquide coulant le long de la colonne, des communications d'un élément à l'autre qui dérivaient une partie du courant. Enfin elle donnait lieu aux phénomènes de polarisation. Aussi a-t-elle été complètement abandonnée.

PILES A DEUX LIQUIDES

133. Pile Daniell. — La pile Daniell est formée de deux liquides séparés par une cloison poreuse : l'un est de l'eau acidulée par de l'acide sulfurique, dans laquelle est plongée une lame de zinc amalgamé ; l'autre est une dissolution de sulfate de cuivre contenant une lame de cuivre. Voici les réactions qui se passent :

L'eau est décomposée, le zinc s'oxyde et forme du sulfate de zinc; l'hydrogène produit, au lieu de s'accumuler sur la lame positive, décompose le sulfate de cuivre; il s'unit à l'oxygène de l'oxyde de cuivre pour reformer de l'eau, et le cuivre mis en liberté se dépose à l'état métallique. Cette action est conforme aux lois de Faraday, et l'on peut constater qu'à chaque équivalent de zinc dissous correspond un équivalent de cuivre mis en liberté.

Les figures 65 et 66 servent à représenter le phénomène. Les molécules sont d'abord dans l'état d'équilibre représenté par la figure 65. Quand le circuit est fermé, elles s'orientent comme l'indique la figure 66, et l'on voit qu'il doit y avoir en même temps

formation d'un équivalent de sulfate de zinc, reproduction d'un équivalent d'acide sulfurique hydraté à la séparation des deux liquides et dépôt d'un équivalent de cuivre.

Le dépôt de cuivre n'exerçant aucune action sur le liquide voisin, l'addition de sulfate de cuivre a eu pour effet d'absorber l'hydrogène et de dépolariser la lame de cuivre. L'expérience montre en effet que la force électromotrice de cette pile est très constante.

C'est même cette force électromotrice qui représente à très peu de chose près l'unité adoptée par la Conférence des unités électriques,

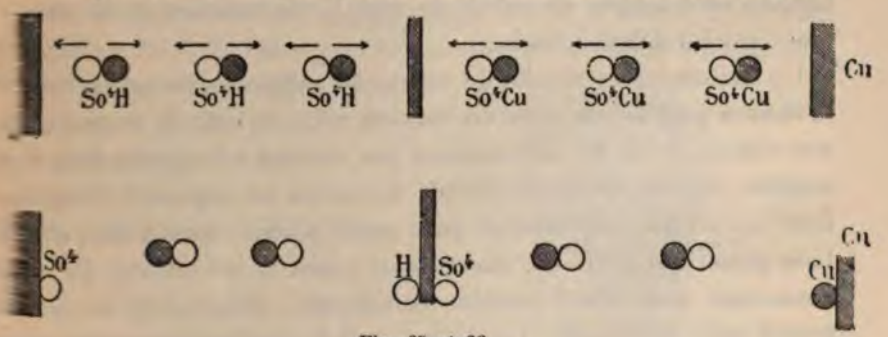


Fig. 65 et 66.

c'est-à-dire le *volt*, comme nous l'avons vu dans la première partie de cet ouvrage. L'élément qui sert d'étalon diffère par quelques détails seulement de celui de Daniell : sa force électromotrice est exactement de 1,07 volt.

La force électromotrice de l'élément Daniell change peu avec la température. M. Sabine a trouvé que, si à 18° elle est égale à 1, à 100° elle ne s'élève qu'à 1,015 Elle varie peu avec l'acidité du liquide et avec la richesse de la solution de sulfate de cuivre.

Mais la résistance de cette pile n'est pas constante ; car la solution de sulfate de zinc va constamment en s'enrichissant et, par suite, sa conductibilité augmente jusqu'à un maximum pour diminuer ensuite, comme le montrent les chiffres suivants :

	Pouvoir conducteur.
Solution concentrée de sulfate de zinc (poids spécifique 1,441).	5,77
— étendue d'un volume d'eau.	7,14
— — de trois volumes d'eau.	5,43

L'effet contraire se produit d'ailleurs dans la solution de sulfate

de cuivre, dont la conductibilité diminue à mesure que la liqueur devient moins concentrée. Il faut donc avoir soin d'y ajouter de temps en temps des cristaux de sulfate, sans que cependant elle soit complètement saturée.

Il y a en outre mélange des deux dissolutions de sulfates. Ces circonstances modifient la résistance de l'élément. Aussi le courant d'une pile Daniell change-t-il à chaque instant, surtout si l'on compare ses valeurs au début, quand la pile ne contient que de l'eau acidulée, et après une action de quelque durée, lorsque les liquides sont saturés de sulfate de zinc. Cette variation de la résistance est un défaut sérieux.

Un inconvénient résulte de ce que le sulfate de cuivre traverse la cloison poreuse et vient en contact avec le zinc. Il se passe là une action locale qui ne concourt pas du tout à la production du courant, et une certaine quantité de cuivre se dépose à l'état de boue : c'est une dépense en pure perte. Cette action a lieu aussi bien quand le circuit est ouvert que quand il est fermé ; la pile consomme donc d'une manière continuelle, même sans avoir de travail utile à produire. Ce défaut se fait d'autant plus sentir que le travail de la pile est plus intermittent et avec de plus longs intervalles de repos ; il est assez grave dans les installations téléphoniques ou télégraphiques, et l'on préfère souvent pour ces applications employer des éléments moins constants, mais qui ne consomment que pendant leur période d'action ; nous les décrirons plus tard.

Un autre défaut de cette pile est que le vase poreux se recouvre vite de dépôts adhérents de cuivre ayant l'aspect de végétations ; les mêmes dépôts se produisent dans l'intérieur du vase et en traversent les cellules. Une communication métallique peut ainsi s'établir entre le cuivre et le zinc ; cette communication se fait aussi par les boues qui s'accumulent au fond du vase. Pour y remédier, on suspend quelquefois le bâton de zinc au milieu du vase poreux, et l'on recouvre de cire le fond du vase.

La pile Daniell présente encore un inconvénient : la formation de *sels grimpants*. Quand la dissolution de zinc commence à se saturer, elle forme des cristallisations le long du vase extérieur, qui peuvent quelquefois établir des communications anormales.

Comme la solution de sulfate de zinc à son maximum de saturation est moins conductrice que quand elle est étendue d'eau, le remède indiqué est de maintenir toujours ce liquide dans un état tel qu'il puisse dissoudre tous les cristaux qui se forment sur le vase. Cet inconvénient n'est pas grave, et l'on y remédie avec un peu de soin. Quelquefois, pour empêcher les sels grimpants de déborder du vase de verre, on enduit la partie supérieure de ce dernier d'une substance grasse, cire ou paraffine.

134. Modifications de la pile Daniell. — *Pile à ballon.* L'élément Daniell a reçu quelques perfectionnements. Voici une disposition qui dispense de tous les soins nécessités par le renouvellement du sulfate de cuivre :

Le sulfate, à l'état de cristaux, est contenu dans un ballon en verre qu'on remplit d'eau. On le ferme avec un bouchon traversé par un tube, et on le renverse dans le vase poreux, de façon que le tube descende dans le liquide du vase (fig. 67). En raison de sa densité, la dissolution saturée de sulfate tend à s'écouler, et elle maintient le liquide du vase poreux à saturation. Avec cette disposition, on peut mettre d'avance dans une pile la provision de sulfate pour plusieurs mois.

Fig. 67.

On a proposé de remplacer les vases poreux en terre, qui augmentent beaucoup la résistance de l'élément, par des cylindres de parchemin, de papier, de cuir, de plâtre, de vessie ; mais ces dispositions sont moins commodes que le vase de terre. On les emploie pourtant dans quelques cas, par exemple, en galvanoplastie, où l'on a besoin de diaphragmes de grande dimension ; on se sert alors de toile à voile ou de parchemin.

Nous décrirons, en parlant de la galvanoplastie, le système dit de la *pile simple* qui repose sur le même principe que la pile Daniell,

et dans lequel c'est le bain lui-même qui fournit la dissolution de sulfate.

Pile à auge (modèle anglais). — Ce système est assez employé en Angleterre. Il se compose d'une boîte en bois divisée en dix compartiments par des plaques d'ardoise. Chacun d'eux est partagé en deux cellules par une plaque de porcelaine blanche. On place à cheval sur chaque ardoise une plaque de cuivre qui supporte, d'un côté une lame de cuivre, de l'autre un zinc fondu. On met une dissolution de sulfate de cuivre avec le cuivre, et de l'eau acidulée avec le zinc. Les deux cellules, situées aux extrémités de la boîte,

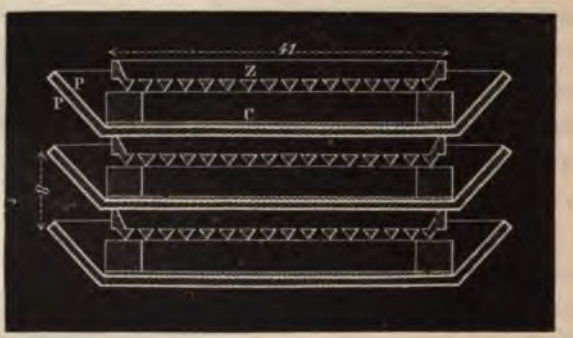


Fig. 68.

renferment l'une un zinc et l'autre un cuivre qui constituent les deux pôles de la pile.

Cette disposition a l'avantage de supprimer les vases en verre ; elle est d'un transport facile et peu encombrante. La difficulté est de maintenir la boîte en bois bien étanche.

Pile de sir William Thomson. — Dans la pile de sir William Thomson les éléments sont superposés (fig. 68). Ils sont formés de plateaux en bois P doublés intérieurement de plomb. Au fond du plateau est une feuille de cuivre C qui constitue l'une des électrodes. Aux quatre coins du plateau on met des cales en bois qui portent le zinc Z ; celui-ci a la forme d'une grille, dont les pieds renversés sont tournés vers le haut et servent de support à l'élément supérieur.

En général, le zinc est entouré de parchemin qui forme le dia-

phragme poreux. La communication des éléments est obtenue par leur superposition, et leur poids les applique l'un contre l'autre. Pour cela, la feuille de cuivre est munie d'un appendice recourbé qui vient s'appuyer contre le zinc de l'élément inférieur. Il faut que les éléments soient bien horizontaux.

L'avantage de cette pile est sa faible résistance intérieure. On charge les éléments avec une solution de sulfate de zinc de densité 1,1, et l'on ajoute le sulfate de cuivre en petits cristaux placés aussi régulièrement que possible tout autour et au fond du plateau ; on ne peut guère empiler plus de 8 à 10 éléments en une seule colonne.

Ce système est peu connu en France ; mais on en fait un assez grand usage en Angleterre et en Russie.

Au lieu de prendre des plateaux en bois que l'humidité détériore, on emploie avec avantage du carton durci. On se dispense ainsi du doublage en plomb ; mais les éléments doivent être réunis par des lames extérieures.

135. Piles du système Daniell sans diaphragme. — Pour diminuer la résistance des piles construites d'après le principe de Daniell, on a eu l'idée de supprimer complètement le diaphragme interposé entre les deux liquides, et pour opérer la séparation des deux dissolutions, on a mis à profit la différence de leurs densités. Mais ce système ne convient pas quand on doit souvent déplacer l'appareil, parce que tout mouvement entraîne nécessairement le mélange des liquides.

Pile Callaud. — Dans un vase de verre se trouve placé, à la partie supérieure, un cylindre en zinc supporté par trois crochets qui s'appuient sur le bord du verre (fig. 69). Au fond du vase est une bande mince de cuivre enroulée en cylindre et fixée à une tige verticale de cuivre qui se recourbe au-dessus du verre et forme le pôle positif. Cette tige est recouverte d'une enveloppe en gutta-percha qui la protège contre l'action destructive des liquides.

Pour monter l'élément, on verse, jusqu'à une faible distance au-dessous du bord supérieur du zinc, de l'eau pure ou plutôt de l'eau contenant un dixième de solution saturée de sulfate de zinc, ce qui

diminue la résistance intérieure. L'addition de sulfate de cuivre se fait avec un siphon qui amène au fond du verre la dissolution préparée à l'avance et marquant 23 degrés à l'aréomètre de Baumé.

Le sulfate de cuivre s'épuise à la longue ; on le reconnaît à la couleur de la liqueur qui devient moins bleue ; on rajoute alors du sulfate de cuivre dissous ; mais, avant de le faire, il est bon d'enlever un peu d'eau à la partie supérieure. Il faut, d'ailleurs, éviter de mettre du sulfate de cuivre en excès ; car la saturation de la dissolution cuivreuse favorise la formation de dépôts de cuivre sur le zinc et, par suite, la production de courants locaux qui usent du

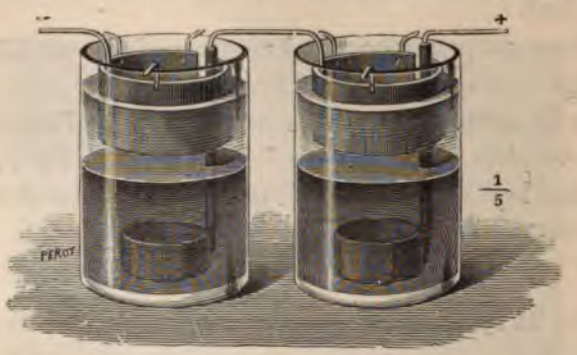


Fig. 69.

zinc en pure perte. Quand il se forme sous le zinc des dépôts métalliques en grappes, il faut les faire tomber au fond du vase avant qu'ils n'arrivent à la couche de séparation des deux liquides.

La résistance de l'élément est faible ; mais elle varie beaucoup avec la quantité de sulfate de zinc qu'il contient. Ainsi la résistance au bout d'un mois de fonctionnement peut être quatre à cinq fois moindre que celle observée au moment où la pile vient d'être montée et contient très peu de sulfate de zinc. M. Gaugain a trouvé les résultats suivants : 37 ohms au commencement et 5,5 ohms après vingt-trois jours de marche.

On recommande de démonter la pile tous les trois mois ; mais bien entretenue, elle peut rester un an sans exiger de nettoyage à fond.

Quand elle a besoin d'être renouvelée, il faut gratter à vif les zincs pour ôter les dépôts qui couvrent leur surface.

La pile Callaud est très employée sur les lignes télégraphiques en France et aux Etats-Unis.

On ferme quelquefois l'élément par deux lames de verre pour empêcher l'évaporation.

Cette pile est très économique, comme le prouvent les chiffres suivants cités par M. Niaudet : 26 piles de 18 éléments chacune, réparties dans autant de stations télégraphiques et entretenues par des personnes différentes, ont entraîné une dépense de 0 fr. 72 par an et par élément, pendant une période de trois ans.

La suppression du vase poreux diminue beaucoup la résistance de la pile, et l'absence de diaphragme, au lieu d'augmenter les actions locales, semble les réduire ; car la diffusion des deux liquides est moindre quand ils sont séparés par leur différence de densité, que quand ils le sont par une cloison poreuse.

Pile Meidinger. — La pile Meidinger (fig. 70) se compose d'un verre A, au fond duquel est placé un gobelet *d* qui contient le pôle cuivre, formé d'une lame *e* enroulée en cylindre : un gros fil de cuivre *g* y est attaché et monte verticalement, protégé par une gaine en gutta-percha. Le cylindre de zinc Z est soutenu à la partie supérieure du vase en verre. L'élément est fermé par un couvercle qui maintient en place les tubes et les pôles et empêche l'évaporation.

Fig. 70.

Au milieu de l'appareil est un tube de verre *h* percé à sa partie inférieure et plongeant au milieu du gobelet ; il est rempli de cristaux de sulfate de cuivre destinés à entretenir la dissolution à l'état de saturation. Les deux liquides sont séparés sans l'intermédiaire d'un diaphragme par suite de leur différence de densité, comme dans la pile Callaud.

En outre de la suppression de ce diaphragme, cette disposition présente certains avantages. Les dépôts de cuivre qui se forment sur le zinc tombent en dehors du petit verre central et ne se mêlent pas à la solution de cuivre, comme nous l'avons signalé dans la pile Callaud.

L'élément contient un grand volume d'eau pour dissoudre le sulfate de zinc qui se forme, ce qui est nécessaire afin que la pile dure longtemps sans exiger de soins.

En dernier lieu, M. Meidinger a remplacé le cuivre par du plomb, ce qui ne modifie nullement les réactions chimiques ; car ce plomb se recouvre vite d'une couche de cuivre. Le fil de cuivre servant de conducteur a été aussi remplacé par une lame de plomb qui n'exige plus l'enveloppe de gutta, ce métal n'étant pas attaqué par les acides de la pile. Enfin, on a adopté pour réservoir à sulfate de cuivre un ballon comme celui que nous avons décrit à propos de l'élément Daniell.

La pile Meidinger est très employée en Allemagne. En Russie, elle sert presque exclusivement pour le service télégraphique et les chemins de fer. On admet que la durée réglementaire des éléments est d'un an et quelquefois de quatorze mois, sans qu'on ait besoin d'y toucher. Quand le service est très actif, on renouvelle le sulfate environ tous les six mois.

136. Piles dérivées de la pile Daniell. — On peut construire des éléments ayant des qualités analogues à ceux de Daniell, en remplaçant le cuivre par un autre métal et le sulfate de cuivre par un sel de ce même métal. C'est ainsi qu'on fait des piles composées comme il suit :

Zinc. Sulfate de zinc. — Cadmium. Sulfate de cadmium.

Zinc. Sulfate de zinc. — Aluminium. Sulfate d'aluminium.

La pile au cadmium a une force électromotrice de 0,31 volt.

La pile à l'aluminium n'a que 0,2 volt.

Ces appareils ne sont guère employés que dans les laboratoires quand on veut avoir des fractions de volt déterminées.

137. Pile à sulfate de mercure Marié-Davy. — M. Marié-Davy a imaginé la disposition suivante pour une pile à sulfate de mercure (fig. 71). Le zinc Z, de forme cylindrique, entoure un vase poreux P qui contient une pâte liquide de sulfate de mercure. L'électrode positive C est en charbon ; elle est revêtue à sa partie supérieure d'un dépôt électrolytique de cuivre, sur lequel est soudée une lame de même métal constituant le pôle positif. La tête

du charbon est imprégnée de paraffine, pour empêcher les liquides de s'élever par capillarité et d'attaquer les conducteurs en cuivre. L'action chimique est semblable à celle de la pile Daniell : réduction du sulfate de mercure et dépôt de mercure métallique dans le vase poreux ; formation d'une quantité équivalente de sulfate de zinc.

Les avantages de cette pile sont :

1° Sa force électromotrice, qui est 1,5 volt ;

2° Le sulfate de mercure, étant très peu soluble, se répand fort lentement dans le liquide extérieur ; les actions locales sont donc très faibles et il y a peu de travail perdu.

Mais son inconvénient provient du prix élevé du sulfate de mercure, qui est en outre un poison très violent.

Enfin, cette pile s'affaiblit quand elle travaille trop longtemps d'une façon continue ; cela tient à la faible solubilité du sulfate de mercure. Si la pile travaille beaucoup, le sulfate dissous se trouve assez rapidement épuisé, et l'élément marche comme s'il était à un seul liquide.

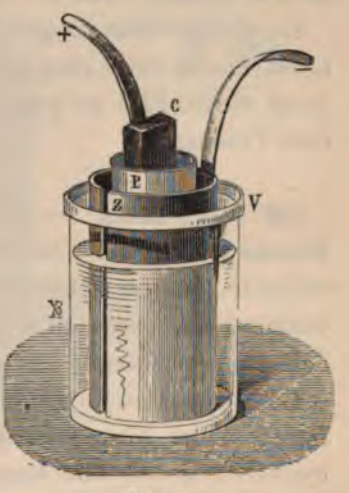


Fig. 71.

Cet inconvénient se remarque beaucoup moins quand la pile fonctionne à de nombreux intervalles, parce que la dissolution a le temps de s'enrichir dans les moments de repos. On peut constater un fait semblable dans toutes les piles à sel dépolarisant peu soluble.

PILES A ACIDES

138. Pile de Grove. — Dans les piles que nous venons de voir, l'oxygène dépolarisant est fourni par la décomposition d'un sulfate. Grove eut l'idée de se servir, pour obtenir le même résultat, d'acides riches en oxygène et, entre autres, de l'acide azotique. Son

élément est formé d'une lame de zinc baignant dans de l'acide sulfurique étendu, et d'un vase poreux contenant de l'acide azotique, avec une lame de platine qui forme le pôle positif.

Le zinc se dissout dans l'acide sulfurique, et l'hydrogène, produit par la décomposition de l'eau, vient réduire l'acide azotique en reformant de l'eau et donnant du bioxyde d'azote AzO^2 ; la pile est ainsi dépolarisée. Le bioxyde d'azote, au contact de l'air, se change en acide hypoazotique AzO^4, que l'on reconnaît à ses vapeurs rutilantes. Mais il est probable que cette réaction n'est pas la seule et qu'il se produit aussi de l'acide azoteux AzO^3.

La pile de Grove a pour force électromotrice 2,06 volts. Son inconvénient est d'employer du platine dont le prix est excessivement élevé. Elle ne peut donc avoir de nombreuses applications dans l'industrie.

139. Pile Bunsen. — En se basant sur les mêmes principes, Bunsen a modifié l'élément de Grove et est arrivé à la disposition suivante, qui est généralement adoptée en France et qui est plus économique, parce qu'il a renoncé à se servir de platine pour l'électrode positive.

Le vase extérieur est en grès vernissé (fig. 72). Le zinc Z est formé d'une plaque de 4 millimètres d'épaisseur enroulée en cylindre ; il doit être bien amalgamé. Le vase poreux est placé au milieu du zinc et contient un prisme en charbon de cornue C qui le dépasse à la partie supérieure. Les conducteurs sont réunis par des pinces à vis, comme l'indique la figure.

Quand on monte une pile, il faut avoir grand soin de nettoyer les contacts avec du papier de verre, car les vapeurs nitreuses qui se dégagent de l'appareil ternissent rapidement toutes les surfaces métalliques. On emploie de l'acide nitrique du commerce marquant 36 à 40° ; on le remplace quelquefois par un mélange de 2 parties en poids d'acide nitrique et de 5 parties d'acide sulfurique. Le liquide destiné à dissoudre le zinc est formé d'eau contenant 8 à 12 parties en poids d'acide sulfurique pour 100 de mélange.

La force électromotrice de l'élément Bunsen est un peu inférieure à celle de l'élément Grove : elle est de 1,90 volt. Sa résistance est, à dimensions égales, bien plus faible que celle de la pile Daniell.

Aussi s'en sert-on quand on veut un courant très puissant, par exemple pour la lumière électrique.

Voici les résultats d'expériences faites par M. d'Arsonval :

Dans une pile Bunsen formée de zinc amalgamé et d'acide sulfurique au vingtième en volume, si le vase poreux contient de l'acide nitrique à 36 ou 40° Baumé, on a, avec un élément de $0^m,20$ de hauteur, une résistance intérieure de 0,08 à 0,11 ohm, et une force électromotrice de 1,8 volt. Quand l'acide marque 36 à 32°,

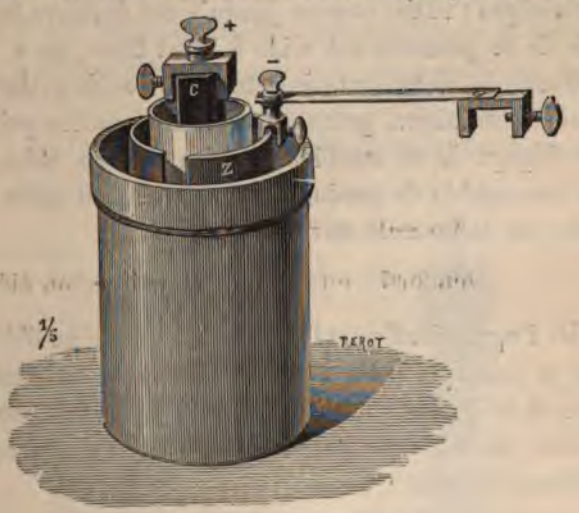


Fig. 72.

l'élément consomme 1 gr, 3 de zinc par ampère et par heure, et la dépense en acide nitrique est de 1 kilogramme pour 130 grammes de zinc.

Quand le degré de l'acide descend vers 28°, la quantité d'acide est trop faible et l'élément ne peut plus servir. Cela tient à ce que la résistance de la pile augmente au fur et à mesure de l'appauvrissement de la solution d'acide nitrique. Il résulte aussi de là que, cet acide ne se renouvelant pas, la pile n'est pas constante ; c'est un de ses inconvénients. En outre, on dépense en pure perte une assez grande proportion d'acide, puisqu'à 28° on est obligé de le changer. Les produits nitreux peuvent, il est vrai, se revendre dans le commerce ; mais le prix en est à peine de 15 francs les 100 kilogrammes, tandis que l'acide à 36° vaut 55 francs.

Un grave défaut de ces piles est le dégagement d'acide hypoazotique auquel elles donnent lieu. Ces vapeurs nitreuses sont assez fortes pour qu'on ne puisse pas placer les piles Bunsen dans un atelier où travaillent des ouvriers ; on est obligé de les mettre à part dans un local bien ventilé.

140. Piles au bichromate de potasse. — Dans les piles au bichromate de potasse, l'oxygène dépolarisant est emprunté à l'acide chromique ; mais, comme jusqu'à ces derniers temps il était difficile de se procurer cet acide à l'état libre, on a eu recours à un mélange de bichromate de potasse et d'acide sulfurique, dans lequel l'acide chromique, grâce à ses affinités moins puissantes, est bientôt dégagé de sa combinaison. On sait, en effet, que ce mélange est susceptible de produire de l'oxygène d'après la réaction indiquée par la formule suivante :

$$KO, 2CrO^3 + 4SO^3 = Cr^2O^3, 3SO^3 + KO, SO^3 + O^3.$$

M. Poggendorff a eu l'idée de constituer un élément de pile basé sur ce principe. Il se compose d'un vase contenant un cylindre en zinc et de l'acide sulfurique étendu de 12 fois son poids d'eau. Au centre est un vase poreux contenant un charbon et rempli du mélange suivant :

100	parties	d'eau ;
12	—	de bichromate de potasse ;
25	—	d'acide sulfurique.

La force électromotrice de cette pile, d'après Clark et Sabine, est de 2,028 volts. Ce chiffre très élevé s'observe au début de l'action ; mais c'est un maximum, et il baisse assez rapidement, surtout quand la pile fonctionne en court circuit.

Pile Fuller. — On emploie en Angleterre le système à bichromate, dit *Pile Fuller*. Le zinc est intérieur ; et, comme il doit être bien amalgamé, on verse du mercure en excès au fond du vase poreux. Cette pile donne de bons résultats pour la télégraphie ; elle est moins résistante que celle de Daniell et a une force électromotrice double. Ces deux qualités réunies en permettent l'usage dans le système de groupement des piles très usité maintenant en

télégraphie, où une même pile est commune à plusieurs circuits, ce qui exige des éléments peu résistants et ayant une grande force électromotrice.

Pile Grenet ou pile-bouteille. — M. Grenet a supprimé le vase poreux et a donné à sa pile la forme d'une bouteille sphérique à long col fermée, par un couvercle en ébonite (fig. 73). Ce couvercle porte deux plaques de charbon parallèles K, qui descendent dans le vase, et entre lesquelles est placée une plaque de zinc amalgamé Z attachée par son extrémité supérieure à une tige de laiton. Cette tige glissant à frottement doux permet de plonger le zinc dans le liquide ou de le remonter dans le goulot. Le contact entre le zinc et le charbon est empêché par de petits morceaux de caoutchouc durci. Cette pile a les avantages suivants :

Fig. 73.

Très faible résistance. Polarisation fortement diminuée par la grande surface des charbons. De plus, l'usure du zinc est supprimée à circuit ouvert, puisque l'électrode négative est retirée du liquide lorsque la pile ne fonctionne pas.

L'énergie de la pile baisse assez rapidement. Cet affaiblissement est dû non pas à un effet de polarisation proprement dit, mais surtout à une altération rapide du liquide et à un dépôt d'oxyde de chrome et d'alun de chrome qui se fait sur l'électrode positive. On remédie à cet inconvénient en agitant le liquide.

Pile Trouvé. — La pile Trouvé est une modification des éléments au bichromate sans vase poreux décrits ci-dessus. Chaque batterie comprend six éléments, et se compose d'une auge en chêne garnie de six cuvettes en ébonite contenant le liquide de chaque pile (fig. 74). Les zincs et les charbons sont reliés entre eux par des pinces mobiles et sont suspendus à une tringle horizontale. Une petite manivelle, munie d'une roue à rochet, permet

de régler à volonté le degré d'immersion des couples. On peut ainsi plonger les électrodes de la quantité qu'on juge nécessaire, et les retirer complètement au moment de l'ouverture du circuit.

Chaque élément est formé d'une lame de zinc et de deux charbons, dont la partie supérieure est recouverte d'une couche de cuivre déposée par l'électrolyse. Ce cuivrage a pour but de conso-

Fig. 74.

lider le charbon et d'augmenter en même temps sa conductibilité dans la partie extérieure à la pile.

Le liquide pour une batterie de 6 éléments est formé de :

Eau	8kil.
Bichromate de potasse pulvérisé	1 ,2
Acide sulfurique	3 ,6
TOTAL	12kil.,8

Pour donner de la constance à sa pile, M. Trouvé emploie des précautions toutes particulières dans la préparation du liquide.

L'eau dissout à froid environ $\frac{1}{10}$ de son poids de bichromate de potasse; si l'on opère à chaud, la proportion est plus forte ; mais

par le refroidissement, il se dépose des cristaux qui encombrent la pile. Enfin, lorsque l'élément au bichromate a marché pendant quelque temps, il s'y forme, comme nous l'avons vu pour la pile Grenet, de l'alun de chrome qui encrasse les charbons. Pour éviter ces inconvénients, M. Trouvé opère de la façon suivante : Il met dans de l'eau du bichromate *en poudre*, dans la proportion de 150 et même 250 grammes par litre. Après avoir agité, il verse en *mince filet* et *très lentement* jusqu'à 450 grammes d'acide sulfurique par litre. Le mélange s'échauffe peu à peu, et le bichromate, une fois dissous, reste limpide et ne cristallise pas par le refroidissement. Enfin, l'alun de chrome ne prend pas naissance dans ce liquide. Il y a là une sorte de maximum de saturation atteint une fois pour toutes, et la constance de la pile est assurée par le fait que la solution est sursaturée. Tant que le sel en excès ne se trouve pas épuisé, la pile reste constante. Ensuite, elle rentre dans les conditions de toutes les piles au bichromate.

141. Pile au bichromate de soude. — On a proposé depuis quelque temps de remplacer la potasse par la soude dans les piles à bichromate. La principale raison de cette substitution est le bon marché des sels de soude ; elle est assez importante, puisque le prix de revient du courant fourni par les piles est aujourd'hui le principal obstacle à leur emploi.

La soude présente, d'ailleurs, une autre qualité : elle donne un courant plus constant que la potasse, ainsi que l'a démontré récemment M. S.-L. Harding, qui explique ce fait de la manière suivante. Les deux piles appartenant à la catégorie générale dans laquelle l'oxygène dépolarisant se combine avec l'hydrogène dégagé, et donnant lieu toutes les deux à une production d'acide chromique, le sel le plus avantageux est celui qui, pour un poids donné de solution, fournit la plus grande quantité d'acide chromique. Or 100 parties d'eau dissolvent 12, 5 parties de bichromate de potasse et 83, 16 parties de bichromate de soude. La supériorité doit donc appartenir à celui-ci qui donne une solution contenant cinq fois plus d'oxygène que le bichromate de potasse.

Enfin, nous devons ajouter que la force électromotrice de l'élément au bichromate de soude est légèrement supérieure à celle de

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible] Renard, [illegible] une puissance électrique [illegible] employés dans les [illegible] développe 1 cheval sous [illegible]

[illegible] est aussi plus grande [illegible] c'est-à-dire qu'il fournit le tra- [illegible] cheval-heure sous un poids égal aux deux tiers de celui [illegible] pile au bichromate. Cela tient à la suppression de la base [illegible] qui absorbe un équivalent d'acide.

M. Renard recommande de faire fonctionner sa pile de façon que la différence de potentiel aux bornes soit de 1,2 volt; dans [illegible] conditions, le rendement est maximum.

Enfin, il faut noter que la présence des sels étrangers diminue rapidement l'activité spécifique de la pile ou le nombre de watts fournis par kilogramme de pile. La présence de l'acide sulfurique

produit le même effet; mais, en le substituant équivalent à équivalent à une partie de l'acide chlorhydrique, on obtient des liquides dits *atténués*, dont la puissance est diminuée, il est vrai, mais dont la capacité reste la même que celle du liquide chlorochromique normal. Ces liquides peuvent servir lorsqu'on n'a pas besoin d'une pile ayant une puissance maxima.

PILES A OXYDES

Nous venons de voir que les acides oxygénés, placés autour de l'électrode positive, peuvent la dépolariser en se décomposant et oxydant l'hydrogène pour former de l'eau. Le même résultat peut être obtenu avec certains oxydes facilement réductibles, comme le bioxyde de manganèse, le peroxyde de plomb et l'oxyde de cuivre.

143. Pile Leclanché. — C'est sur l'usage du bioxyde de manganèse qu'est basée la pile Leclanché, dont l'emploi est aujourd'hui très répandu.

Dans cet élément, l'électrode soluble est le zinc, le dépolarisant est le bioxyde de manganèse, et le liquide excitateur est formé d'une dissolution de chlorhydrate d'ammoniaque. M. Leclanché exprime comme il suit les réactions qui se produisent :

$$Az\,H^4\,Cl + 2\,Mn\,O^2 + Zn = Mn^2\,O^3 + Az\,H^3 + HO + Zn\,Cl.$$

Le zinc est attaqué par le chlore et se transforme en chlorure; l'ammoniaque est mise en liberté; quant à l'hydrogène, dont on veut détruire l'action polarisante, il se combine à l'oxygène pour produire de l'eau, en réduisant le peroxyde de manganèse qui passe à l'état de sesquioxyde.

En réalité, il y a des phénomènes secondaires qui compliquent un peu les réactions. Le chlorhydrate d'ammoniaque et le chlorure de zinc, agissant l'un sur l'autre, donnent un chlorure double d'ammonium et de zinc. Il se produit aussi de l'oxychlorure de zinc. Ces sels peu solubles augmenteraient beaucoup la résistance de l'élément; on les maintient dissous en employant une dissolu-

tion saturée de sel ammoniac. En outre, il est reconnu que la pile se polarise ; il y a donc une certaine quantité d'hydrogène qui ne s'oxyde pas et qui reste adhérente au charbon.

Avant d'employer le sel ammoniac, M. Leclanché avait essayé les chlorures de sodium et de potassium ; mais les résultats obtenus étaient bien inférieurs. La force électromotrice était moindre, et la pile se polarisait plus vite.

Fig. 75.

Il existe deux types différents de la pile Leclanché : l'un avec vase poreux, le second à plaques agglomérées sans vase poreux.

1° *Pile Leclanché à vase poreux.* — Ce modèle se compose d'un vase en verre prismatique (fig. 75), avec goulot cylindrique. Ce goulot porte une petite cavité où vient se loger le zinc, formé d'un simple crayon cylindrique, en haut duquel est soudé un fil de fer zingué. Dans ce récipient en verre est un vase poreux qui contient, en quantités presque égales, du peroxyde de manganèse et du charbon de cornue.

A son centre est placée une plaque de charbon surmontée d'une

tête de plomb moulée dans une lingotière. Un bouton de laiton se visse sur cette tête et constitue le pôle positif. Dans le vase en verre, on verse une dissolution de sel ammoniac jusqu'à moitié hauteur du vase poreux. Il faut que le sel soit aussi pur que possible pour empêcher les actions locales. La dissolution doit être concentrée, et il n'y a pas d'inconvénient à mettre un petit excès de sel qui se dissout au fur et à mesure de sa consommation.

La qualité du bioxyde joue un rôle important ; il ne faut pas l'employer en poudre, on doit choisir celui qui est connu dans le commerce sous le nom de *manganèse aiguillé*. Il est cristallisé, soyeux, et il faut le passer au crible pour en retirer la poussière et conserver seulement les grains assez gros. En comparant des piles montées avec des grains un peu gros et de la poudre, on a obtenu les chiffres suivants rapportés au volt :

	Poudre fine.	Poudre grossière.
Force de polarisation après 15 minutes.	0,300	0,082
— — 30 —	0,450	0,090
— — 45 —	0,500	0,110
— — 60 —	0,510	0,118

Il faut, autant que possible, employer du zinc laminé, ou mieux encore passé à la filière, parce qu'il est plus homogène et donne une action plus régulière. Comme on ne se sert pas d'acide, il semble que le zinc ne doive pas être amalgamé : il n'en est rien, car s'il ne l'était pas, les cristaux qui se produisent s'attacheraient au métal et en diminueraient la surface conductrice.

2° *Pile Leclanché à aggloméré.* — Comme il n'y a pas, dans son système de pile, deux liquides à séparer l'un de l'autre, M. Leclanché a pensé que le vase poreux constituait une résistance tout à fait inutile. Il a donc construit un modèle dans lequel le bioxyde de manganèse et le zinc baignent dans le même liquide sans aucun diaphragme (fig. 76). Il forme des plaques agglomérées de charbon et de bioxyde de manganèse, composées de 40 parties de bioxyde, 55 de charbon et 5 de résine gomme laque. Le tout est soumis à une pression de 300 atmosphères à une température de 100°. Enfin, il ajoute à la masse 3 ou 4 p. 100 de bisulfate de potasse, qui sert à faciliter la dissolution de l'oxychlorure. L'électrode de charbon est placée entre deux de ces plaques qu'elle

dépasse à sa partie supérieure, et contre lesquelles elle est serrée par des bagues en caoutchouc.

L'avantage de ce système est de diminuer la résistance de la pile et d'en simplifier la construction. On a, en outre, la facilité de changer les plaques sans perdre le charbon. Il n'y a que le zinc et l'aggloméré qui se détruisent.

Fig. 76.

On peut diminuer à volonté la résistance des éléments en employant une, deux ou trois plaques agglomérées. M. Leclanché indique la force électromotrice de l'élément à vase poreux comme égale à 1 volt, 38. Il donne 1,6 pour la pile à aggloméré.

Mais ces chiffres s'appliquent à l'élément nouvellement monté. La force diminue dès que la pile est en fonction, par suite de la polarisation qui n'est pas complètement évitée; la force décroît même très rapidement quand la résistance du circuit extérieur est faible, mais elle reprend sa valeur première après quelques instants de repos. La polarisation est au contraire très lente si le circuit offre une grande résistance. Elle devient peu sensible si la pile ne

fonctionne que d'une manière intermittente, comme dans la télégraphie et la téléphonie.

Le grand avantage de cet élément est de ne rien consommer à circuit ouvert et de reprendre par le repos sa force primitive. De plus, les matières qui entrent dans sa composition sont d'un prix peu élevé ; le liquide ne gèle pas par des froids très rigoureux. Aussi l'usage de cette pile est-il très répandu pour toutes les lignes télégraphiques d'Europe, dans les Compagnies de chemins de fer, sur un grand nombre de réseaux téléphoniques et dans toutes les sonneries d'hôtels ou de maisons particulières.

La durée de la pile Leclanché peut être très longue. M. Niaudet cite des éléments qui ont fonctionné plusieurs années sans exiger d'autres soins que l'addition d'un peu de sel ammoniac et d'eau.

Quand la pile est ouverte à l'air, le liquide s'évapore et il se forme des cristaux qui grimpent le long des parois. Pour y obvier, on enduit d'une couche de paraffine la paroi interne du vase dans la partie qui dépasse le niveau du liquide.

Pile Leclanché Barbier. Le nouvel élément que construit actuellement la maison Barbier ne diffère des anciens éléments Leclanché que par la disposition de ses électrodes. Il renferme un cylindre creux en charbon aggloméré au centre duquel est un crayon de zinc (fig. 77) ; le tout plonge dans une solution de sel ammoniac. Cette disposition est avantageuse parce que le dépolarisant est symétriquement réparti autour du crayon de zinc. Le mélange aggloméré se compose de peroxyde de manganèse, de graphite et de brai soumis à l'action du soufre qui opère une vulcanisation analogue à celle du caoutchouc ; cette vulcanisation rend l'aggloméré solide et durable et augmente sa conductibilité comme électrode.

Fig. 77.

Pile Germain. Le principe de la pile Leclanché a été également

adopté par M. Germain dans la construction de sa *pile Bloc*, qu'il a combinée au point de vue de la facilité des transports en immobilisant le liquide : c'est ce qu'on appelle une *pile sèche*.

Dans cet appareil, la solution de chlorhydrate d'ammoniaque est absorbée par la cellulose de noix de coco ou cofferdam, matière qui résiste aux agents chimiques et peut, sans pression extérieure, absorber jusqu'à 11 fois son poids de liquide.

La pile Bloc (fig. 78) est renfermée dans une boîte en bois de

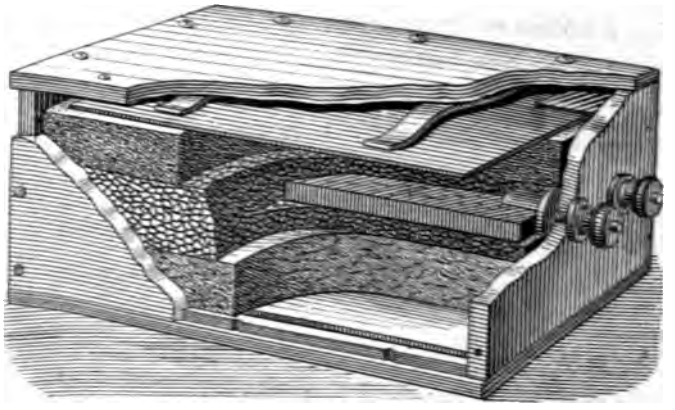


Fig. 78.

chêne, bouillie dans la paraffine pour en chasser l'humidité, puis rendue hermétique par un enduit à base de goudron. Une plaque de zinc bien amalgamée d'un côté et vernie de l'autre repose sur le fond de la boîte reliée à la borne négative ; on pilonne à la main couche par couche un premier matelas de cofferdam imbibé à chaud de la solution de chlorhydrate d'ammoniaque (densité 1,1), dans le rapport de 1 en poids de cellulose pour 3,5 à 4 de liquide. On met alors le charbon entouré d'un lit de granules de charbon et de bioxyde de manganèse et qui forme le pôle positif. On tasse un second lit de cofferdam et l'on applique la seconde plaque de zinc. Par-dessus, enfin, se place une planchette en bois sur laquelle appuient un certain nombre de forts ressorts en acier. La pression voulue, qui est de 200 grammes par cm², est donnée en fermant la boîte à l'aide de vis.

L'élément, dont la force électromotrice est de 1,5 volt, est d'un emploi avantageux toutes les fois qu'il est exposé à de fréquents transports.

144. Pile à oxyde de cuivre. — La pile de Lalande et Chaperon, dans laquelle l'oxyde de cuivre sert de dépolarisant, se compose d'une tige de zinc au pôle négatif, d'un liquide excitateur formé par une solution de potasse caustique à 30 ou 40 p. 100, et d'oxyde de cuivre mis en contact direct avec une lame de fer ou de cuivre qui représente le pôle positif.

Voici les réactions qui prennent naissance :

Le circuit étant fermé, l'eau est décomposée, l'oxygène se porte sur le zinc et donne de l'oxyde de zinc qui forme avec l'alcali un zincate de potasse très soluble. Quant à l'hydrogène, il réduit l'oxyde de cuivre et précipite le cuivre à l'état métallique.

Fig. 79.

Cette pile présente ce grand avantage qu'à circuit ouvert aucune réaction ne se produit, le zinc et le cuivre n'étant pas attaqués par la potasse. La consommation n'a donc lieu qu'en proportion du travail à accomplir.

La pile est construite d'après différents types. Voici les plus employés :

L'élément *hermétique* (fig. 79) est formé d'un vase en verre bouché par un couvercle fixe adhérent. Le zinc amalgamé D passe par une ouverture centrale. Dans un autre trou est le conducteur de cuivre AB, portant à sa partie inférieure une plaque de cuivre recouverte par l'oxyde de cuivre. H est une soupape fermée par un tube de caoutchouc fendu.

Ce type a été récemment perfectionné par l'emploi de l'oxyde de cuivre sous forme de plaques agglomérées placées verticalement en regard des plaques de zinc qui constituent le pôle négatif de l'élément.

L'élément *à auge* (fig. 80) se compose d'une boîte plate B en tôle de fer, dont le fond est recouvert d'oxyde de cuivre. A la

paroi de cette auge est fixée une borne C qui forme le pôle positif; aux quatre angles sont disposés de petits tasseaux L en terre, qui supportent une plaque de zinc amalgamé D et servent en même temps d'isolants. A cette plaque est fixée la borne M du pôle négatif. Cette disposition permet de donner une grande surface à la pile sans qu'elle devienne encombrante.

La force électromotrice de l'élément à oxyde de cuivre est 0 volt, 8 à 0,9. La résistance est très faible et peut être estimée

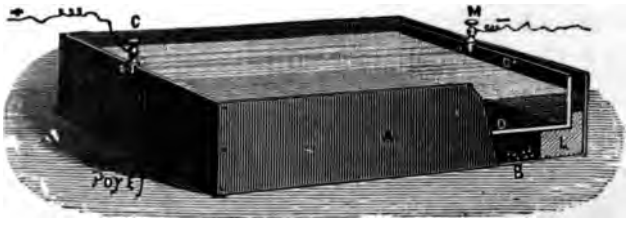


Fig. 80.

à 1/3 d'ohm environ pour des surfaces polaires d'un décimètre carré, distantes de 5 centimètres.

La transformation de la potasse en zincate alcalin ne fait pas varier sensiblement la résistance de la solution alcaline, et la réduction progressive de l'oxyde de cuivre à l'état de métal en augmente la conductibilité. Aussi l'élément possède-t-il une constance remarquable.

PILES A CHLORURES

145. — Dans les systèmes que nous avons exposés plus haut, c'est l'oxygène qui, en s'unissant à l'hydrogène, joue le rôle de dépolarisant. Le même effet peut être obtenu avec d'autres corps qui ont de l'affinité pour l'hydrogène, le chlore, par exemple, d'où les piles à chlorures.

Pile Warren de La Rue. — M. Warren de La Rue a composé de la façon suivante des éléments au chlorure d'argent. L'électrode

soluble est un bâton de zinc non amalgamé, mais de très bonne qualité (fig. 81) ; le zinc de la Vieille-Montagne est indiqué par l'inventeur. Il ne doit pas être amalgamé, à cause de la présence de l'argent dans la liqueur. Le zinc est percé en haut d'un trou où vient se fixer le ruban d'argent qui forme le pôle positif de l'élément suivant; le contact est assuré par un petit coin en laiton.

L'autre électrode est faite avec un petit ruban d'argent recou-

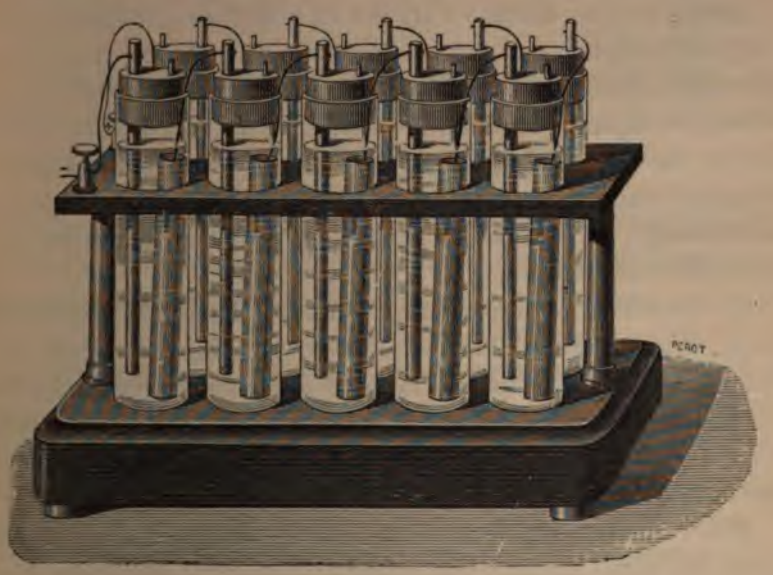


Fig. 81.

vert de chlorure d'argent. Ce dernier est entouré d'une enveloppe en parchemin qui sert à éviter tout contact entre les électrodes.

Le liquide est une solution de sel ammoniac contenant environ 23 grammes de sel pour 1 litre d'eau distillée. Le tout est dans un vase de verre fermé par un bouchon en paraffine qui laisse passer le ruban d'argent.

Les réactions chimiques ont lieu de la façon suivante : le zinc se dissout dans le chlorhydrate d'ammoniaque et forme du chlorure de zinc, l'hydrogène dégagé réduit le chlorure d'argent, et

l'argent se précipite en une masse spongieuse qui se laisse pénétrer facilement par le liquide, de sorte que la réduction peut arriver jusqu'au centre de l'électrode. Quand on fait marcher la pile pour la première fois, il faut fermer le circuit en joignant directement les pôles. On observe aussitôt la réduction d'un peu de chlorure, condition nécessaire pour que le courant de la pile prenne son intensité normale. C'est que le chlorure d'argent est mauvais conducteur ; il faut que sa surface soit recouverte de métal pour que la pile fonctionne régulièrement.

Quand tout le chlorure d'argent est réduit, on a intérêt à retirer l'argent précipité ; mais ce métal se trouve mélangé avec du zinc provenant d'actions secondaires qui ont réduit du chlorure de zinc. Pour l'en séparer, on dissout ce zinc par un peu d'acide chlorhydrique étendu, et l'argent spongieux reste adhérent à la lame d'argent centrale, sans se désagréger. Pour simplifier l'opération du montage, on peut couler le chlorure dans une lingotière contenant plusieurs moules.

La force électromotrice de cet élément, d'après les expériences de M. Warren de La Rue, est de 1,03 volt. En remplaçant le sel ammoniac par le sel marin, la force électromotrice devient 0,97. La résistance peut s'abaisser à 4,3 ohms par élément ; mais elle augmente lentement par suite d'un dépôt d'oxychlorure de zinc sur la tige de zinc.

Pour remettre rapidement en état les éléments dont la résistance est ainsi devenue trop grande, on verse dans la pile 1 centimètre cube d'une dissolution d'acide chlorhydrique de densité 1,16.

M. de La Rue s'est servi de ces piles pour les belles expériences qu'il a entreprises sur la lumière électrique. Il a réuni jusqu'à 11 000 éléments semblables et a obtenu des courants d'une constance parfaite. Ce système est d'une grande simplicité et possède l'avantage, comme toutes les piles qui emploient le sel ammoniac et le zinc, de ne donner lieu à aucune action tant que le circuit n'est pas fermé ; c'est là une qualité précieuse, car ce genre de pile n'est guère employé que pour des expériences assez courtes, espacées à de longs intervalles de temps : il est donc important que l'élément ne s'use pas pendant ces périodes d'arrêt.

Pile de Gaiffe. M. Gaiffe a employé pour ses piles le chlorure d'argent. Ses éléments sont très petits et clos d'une façon hermétique. A cet effet, ils sont contenus dans des boîtes en ébonite avec couvercle à vis.

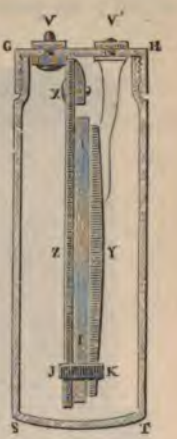


Fig. 82.

Le modèle ci-contre (fig 82), destiné à être souvent transporté, ne contient pas de liquide libre ; les deux électrodes sont séparées l'une de l'autres par plusieurs couches de papier buvard imbibé d'une dissolution à 5 p. 100 de chlorure de zinc.

Le chlorure d'argent est employé fondu. Les électrodes Y, Z sont fixées au couvercle GH par des vis qui font saillie et fournissent les points d'attache V, V' des conducteurs extérieurs. M. Gaiffe a fait un grand usage de cette pile pour produire des courants thérapeutiques et pour exciter les bobines d'induction de ses appareils médicaux.

146. Pile Maiche. — Nous terminerons ce chapitre en parlant de la pile de M. Maiche dont le principe diffère de ceux des éléments étudiés ci-dessus. Dans cette pile, en effet, c'est l'oxygène de l'air qui est employé comme dépolarisant.

L'élément est composé d'un vase en verre (fig. 83) fermé par un couvercle en ébonite supportant une galerie en terre poreuse percée de trous. Cette galerie est pleine de charbon de cornue cassé en fragments et platiné ; le noir de platine peut en effet absorber une quantité considérable d'hydrogène s'élevant jusqu'à 745 fois son volume. La couche de platine qui recouvre les charbons est très mince. Un fil de platine attaché à un fragment de charbon vient se terminer à l'une des bornes du couvercle.

La galerie poreuse est traversée par un tube en ébonite, auquel est fixée une capsule en porcelaine qui contient un peu de mercure et deux lingots de zinc de 50 grammes chacun. Un second fil de platine, qui passe dans le tube en ébonite, établit la communication entre le mercure et une deuxième borne placée sur le couvercle.

Le vase en verre contient de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ; on peut employer aussi une dissolution saturée de chlorhydrate d'ammoniaque ou de sel marin.

Fig. 83.

Le liquide ne doit pas s'élever plus haut que le tiers de la galerie poreuse, afin que le charbon s'imprègne par capillarité et reste toujours exposé à l'air. Grâce à cette disposition, l'oxygène de l'air est mis continuellement en contact avec l'hydrogène absorbé par le platine; c'est ainsi que la dépolarisation se produit. Il y a aussi quelques parties d'hydrogène qui se combinent à l'azote pour former de l'ammoniaque ; c'est encore une dépolarisation. Les produits ammoniacaux ont de plus l'avantage de régénérer la mousse de platine qu'un long usage finit par détériorer.

Cet élément a une force électromotrice de 1,25 volt et une résistance intérieure de 1,5 ohm.

Cette pile ne conviendrait pas pour produire une grande quantité d'électricité d'une manière continue, parce que, dans ce cas, l'absorption d'oxygène ne serait pas assez active pour brûler tout l'hydrogène produit. Au contraire, dans les moments d'arrêt, le charbon se charge d'une quantité surabondante d'oxygène qui lui sert de provision, et l'élément peut produire son maximum d'effet. Il convient donc parfaitement aux sonneries et aux services télégraphique et téléphonique.

Le nombre de systèmes de piles à réactions chimiques est très considérable, et chaque jour on voit naître quelque invention nouvelle. C'est que la production de l'électricité, sans l'intervention de la chaleur ou de la force motrice et par la simple combinaison de réactifs chimiques, est un problème fort séduisant. Nous avons vu par les considérations qui précèdent de combien de difficultés il est malheureusement entouré.

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

147. — C'est Seebeck qui a découvert, en 1828, que la chaleur pouvait se transformer directement en un courant électrique. Voici le principe sur lequel il s'appuie. Si, avec deux lames métalliques de nature différente, on constitue un circuit fermé, et qu'on porte une des deux soudures à une température différente de l'autre, on obtient un courant dans le circuit.

AA' (fig 84) est une lame d'antimoine, aux extrémités de laquelle est soudé un barreau de bismuth BB'. Si l'on chauffe la soudure A' seule, il se produit un courant indiqué par l'aiguille aimantée et allant dans la direction des flèches.

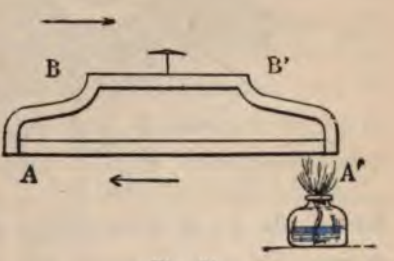


Fig. 84.

On appelle métal *positif* celui dans lequel le courant est dirigé de la soudure froide vers la chaude, et métal *négatif* celui dans lequel le sens du courant est opposé. La liste suivante comprend les principaux métaux dans un ordre tel que chacun d'eux est positif par rapport à ceux qui le suivent. Plus les métaux sont éloignés l'un de l'autre dans cette liste, plus est grande la force électromotrice de l'élément thermo-électrique produit par leur juxtaposition :

Bismuth.	Plomb.
Mercure.	Zinc.
Platine.	Argent.
Or.	Fer.
Cuivre.	Antimoine.
Étain.	Tellure.

Les lois des courants thermo-électriques sont très compliquées. Avec certains métaux, la force électromotrice est proportionnelle à la différence de température des deux soudures : c'est ce qu'on observe dans les couples bismuth-cuivre, cuivre-or. Pour d'autres éléments, par exemple, bismuth-antimoine, il n'y a proportionna-

lité que si la différence de température est petite. Dans
couples elle n'existe plus du tout, et le sens du courant peu
suivant la température.

Pile Clamond. — On a construit divers systèmes d
d'après le prin
Seebeck. Mais
part de ces a
sont restés la p
des cabinets de
que. M. Clamo
pendant imagi
pile d'un usag
commode pour
ratoires et les
d'essais.

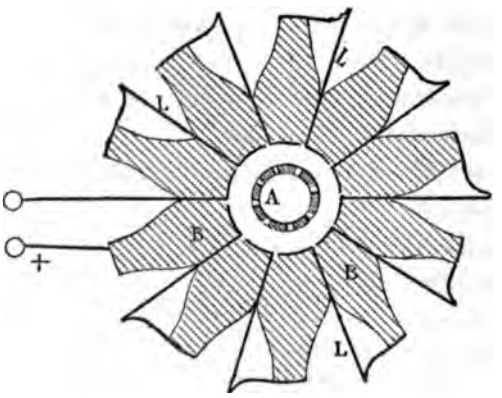


Fig. 85.

Ses élémen
formés de fer et d'un alliage de 2 parties de zinc pour 1
moine. Ils sont disposés par séries de 10 ; chaque série
une couronne circulaire contenant 10 barreaux B d'alliage (

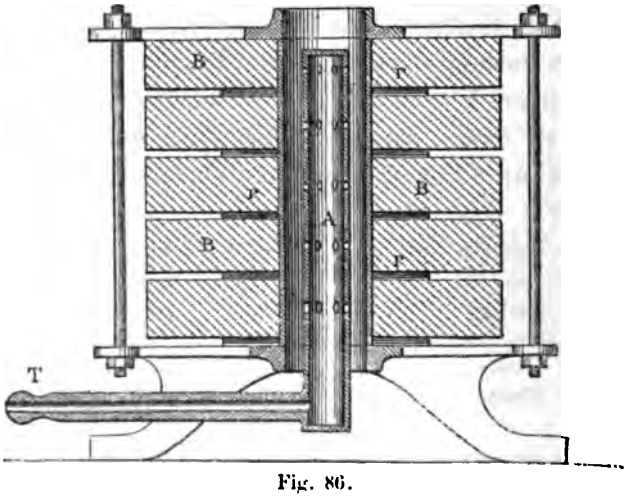


Fig. 86.

reliés l'un à l'autre par des lames de fer L très minces,
sentent une forte saillie à l'extérieur de façon à offrir une
surface de refroidissement. Les couronnes superposées (fig.

réunies entre elles, soit en quantité par leurs pôles semblables, soit en tension par les pôles contraires, et elles sont séparées par des rondelles d'amiante *r*. Dans l'intérieur passe un tuyau A en terre réfractaire, percé de petits trous, qui amène du gaz d'éclairage et permet de chauffer énergiquement les soudures intérieures. Les soudures extérieures sont refroidies simplement par l'air.

L'alliage zinc et antimoine donne la plus grande force électromotrice quand les deux métaux sont alliés à équivalents chimiques égaux. L'inventeur emploie le fer comme deuxième élément, de préférence au cuivre, parce que ce dernier métal est exposé à se dissoudre dans l'alliage.

Deux modèles de piles ont été établis par M. Clamond. L'un comprend 12 couronnes de 10 petits éléments ; ses constantes sont, en marche normale, de 8 volts pour la force électromotrice, et de 3,2 ohms pour la résistance intérieure. L'autre comprend 6 couronnes de 10 gros éléments, il donne 3,6 volts et a une résistance de 0,65 ohm. Ces deux modèles dépensent 180 litres de gaz par heure.

Pile Gulcher. — Avant de quitter les piles thermo-électriques qui n'ont pas encore reçu de sérieuses applications à cause de leur faible puissance spécifique et surtout de leur faible rendement, nous devons dire quelques mots de l'appareil récemment imaginé par M. Gulcher.

Cette pile se compose d'éléments de nickel pur pour les électrodes positives et d'une composition antimonieuse pour les électrodes négatives. Les premières sont en forme de tube et communiquent à leur partie inférieure avec le conduit d'arrivée du gaz.

D'après M. Uppenborn, la pile Gulcher donne une force électromotrice de 3,90 volts et a une résistance intérieure de 0,461 ohm pour une consommation de gaz de 250 litres à l'heure ; dans ces conditions, elle produit un travail de 8,22 watts-heure.

CONDITIONS GÉNÉRALES SUR L'EMPLOI DES PILES

148. Chaleur dégagée par les actions chimiques des piles. — Après avoir passé en revue les différents systèmes de piles les plus employés, nous allons en examiner les applications et étudier les dispositions qu'on doit donner à ces appareils pour en tirer le meilleur parti possible.

Nous avons déjà vu que la force électromotrice était le résultat des réactions chimiques qui ont lieu dans l'appareil. Or, toute réaction chimique peut se traduire par la production d'une certaine quantité de chaleur ; par suite, en calculant cette quantité et en se rapportant à l'équivalent mécanique de la chaleur, on pourra connaître le travail qu'une pile est capable de fournir, soit comme travail effectif, soit comme résistance à vaincre.

Prenons pour exemples les piles de Volta, de Daniell et de Bunsen.

MM. Favre et Silbermann ont indiqué les chiffres suivants pour les nombres de calories correspondant aux réactions chimiques qui se produisent dans ces éléments. (Rappelons que, par définition, la calorie s'applique au kilogramme et au degré centigrade.)

Chaleur dégagée par	la combustion de 1 gramme d'hydrogène.	34,45	calories.
	l'oxydation de 1 équiv. de zinc.	42,80	—
	la combinaison de ZnO avec 1 éq. d'acide sulfurique	10,45	—
Chaleur absorbée par la décomposition de	1 équiv. de sulfate de cuivre.	29,60	—
	1 équiv. d'acide azotique avec formation de . . . . . $AzO^2 + O^3$.	6,88	—
	1 équiv. d'acide azotique avec formation de . . . . . $AzO^3 + O^2$.	13,65	—

Pile de Volta. — Si nous considérons la pile de Volta, nous voyons deux actions distinctes :

1° Oxydation du zinc et combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique. Pour 1 équivalent de zinc dissous (32 gr. 53), la chaleur dégagée est égale à (42,80 + 10,45), soit.	53,25	calories.
2° Décomposition de l'eau, qui absorbe	34,45	—

La chaleur résultant de la dissolution de l'équivalent de zinc

dans la pile de Volta est donnée par la différence 53,25 — 34,45, soit 18,80 calories.

Pile de Daniell. — Dans la pile de Daniell, il se passe quatre phénomènes distincts :

1° Oxydation du zinc et combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique, d'où production de chaleur égale à	53,25	calories.
2° Décomposition de l'eau par le zinc qui absorbe. . . .	34,45	—
3° Décomposition du sulfate de cuivre qui absorbe. . . .	29,60	—
4° Recomposition de l'eau par l'hydrogène et par l'oxygène de l'oxyde de cuivre, d'où production de chaleur égale à . .	34,45	—

La quantité de chaleur dégagée est donc en définitive donnée par la différence 53,25 — 29,60 = 23,65 calories.

Pile de Bunsen. — Dans l'élément Bunsen, il y a :

1° Oxydation du zinc et combinaison avec l'acide sulfurique, d'où production de chaleur égale à	53,25	calories.
2° Décomposition de l'eau par le zinc qui absorbe. . . .	34,45	—
3° Recomposition de l'eau par l'hydrogène dégagé et l'oxygène de l'acide azotique, qui produit.	34,45	—
4° Suivant l'hypothèse qu'on admet sur la nature du produit nitreux qui se forme, on a :		
Avec production de $AzO^2 + O^2$ absorption de.	6,88	—
Avec production de $AzO^3 + O^2$ absorption de.	13,65	—

Dans le premier cas, la chaleur produite est donnée par 53,25 — 6,88, soit 46,37 calories.

Dans le second, on a 53,25 — 13,65, soit 39,60 calories.

On peut compter en moyenne 42,90 calories.

149. Travail fourni par les piles. — Pour qu'une pile puisse accomplir un certain travail, il faut que la somme des calories représentées par ce travail ne dépasse pas celle que la pile est susceptible de fournir. On voit donc *a priori* que, parmi les types que nous venons d'examiner dans le paragraphe précédent, l'élément Bunsen seul est capable de décomposer l'eau, puisque cette décomposition exige 34,45 calories. Cette considération a sa valeur en galvanoplastie et nous reviendrons plus tard sur ce sujet.

150. Groupement des éléments d'une pile. — En exposant la théo-

rie de la pile, nous avons vu que les éléments qui la composent peuvent être groupés de deux manières : 1° le pôle positif de chaque élément est relié au pôle négatif suivant ; 2° les pôles de même nom communiquent tous les uns avec les autres.

Dans le premier système (fig. 61), appelé groupement en *tension* ou en *série*, la force électromotrice totale et la résistance intérieure sont proportionnelles au nombre d'éléments.

Dans le système du groupement en *quantité* ou en *dérivation* (fig. 62), la force électromotrice totale est égale à celle d'un seul élément ; la résistance est inversement proportionnelle au nombre d'éléments. C'est comme si nous avions affaire à une pile d'un seul élément, dont la surface serait égale à la somme de toutes les surfaces.

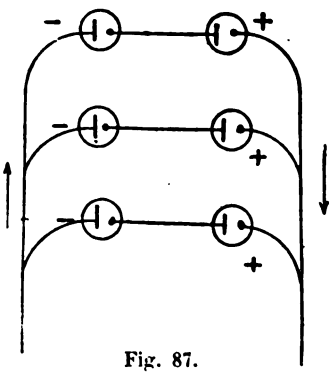


Fig. 87.

Mais il existe, en outre, des combinaisons intermédiaires, par exemple celle qui est indiquée sur la figure 87, où l'on a réuni en quantité trois groupes formés chacun de deux éléments en série ; ce qu'on peut encore exprimer en disant que la pile est formée de deux éléments en tension et de trois en quantité.

151. — Quand on dispose d'un nombre *déterminé* d'éléments, on peut chercher à les grouper de manière à obtenir le maximum d'effet dans le circuit extérieur. Voici les considérations sur lesquelles on s'appuie pour arriver à ce résultat :

1° Supposons d'abord tous les éléments d'une pile disposés en tension. Soit n le nombre d'éléments, r la résistance et e la force électromotrice de chacun d'eux, I l'intensité du courant et R la résistance du circuit extérieur.

La force électromotrice totale de la pile sera ne.

La résistance, nr.

Et l'on aura, d'après la formule de Ohm.

$$I = \frac{ne}{nr + R}.$$

Si R est très petit par rapport à la résistance intérieure de la pile, on a approximativement :

$$I = \frac{ne}{nr} = \frac{e}{r}.$$

On obtient donc sensiblement le même effet avec la série qu'avec un seul élément. Ainsi, quand on a une résistance très faible à vaincre, il n'y a aucun avantage à réunir les éléments en tension.

Si, au contraire, R est très grand par rapport à r, on peut écrire :

$$I = \frac{ne}{R}.$$

Il faut donc disposer les éléments en tension.

2° Supposons en second lieu qu'on groupe tous les éléments en quantité, la force électromotrice est égale à e et la résistance totale à $\frac{r}{n}$.

On a donc :

$$I = \frac{e}{\frac{r}{n} + R} = \frac{ne}{r + nR}.$$

Si R est assez petit pour que nR soit négligeable, on a à peu près :

$$I = \frac{ne}{r}.$$

Donc l'intensité est, dans ce cas, proportionnelle au nombre des éléments réunis en quantité, et cette disposition donne des résultats avantageux.

Si R est très grand, on peut écrire :

$$I = \frac{ne}{nR} = \frac{e}{R};$$

et l'on voit qu'il n'y a aucun intérêt à mettre tous les éléments en quantité.

En résumé, *quand la résistance extérieure est très grande par rapport à celle de la pile, il faut disposer ses éléments en tension; au contraire, si elle est faible, on doit les grouper en quantité.*

3° Quand on possède n éléments égaux, au lieu d'en faire une seule série ou de les réunir tous en quantité, on peut, comme nous l'avons déjà dit, former des combinaisons intermédiaires.

Supposons que nous assemblions en série x éléments, nous pourrons former $\frac{n}{x}$ dérivations semblables.

La force électromotrice totale sera donnée par $E = xe$, et la résistance de la pile totale sera $r' = \frac{xr}{\frac{n}{x}} = \frac{x^2r}{n}$.

Soit R la résistance du circuit extérieur, l'intensité est :

$$I = \frac{xe}{R + \frac{x^2r}{n}} = \frac{nxe}{nR + x^2r}. \qquad (a)$$

Dans cette expression, x varie seul. Pour avoir la valeur de x qui la rend maxima, égalons à 0 la dérivée par rapport à x.

Nous avons :

$$ne\,(nR + x^2r) - 2nrex^2 = 0$$

d'où

$$R = \frac{x^2r}{n}.$$

C'est précisément la valeur de r', c'est-à-dire de la résistance de la pile. Donc, *on obtient l'intensité maxima lorsque la résistance de la pile est égale à celle du circuit extérieur.*

Il résulte directement de la loi de Ohm que, sur un même circuit, les différences de potentiel sont proportionnelles aux résistances. Par conséquent, lorsque la résistance du circuit extérieur est égale à celle de la pile, ou, en d'autres termes, à la moitié de la résistance totale, la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur est égale à la moitié de la force électromotrice. D'où cette règle que nous retrouverons dans tous les calculs suivants :

On obtient l'intensité maxima lorsque la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur est égale à la moitié de la force électromotrice.

On applique alors l'une ou l'autre de ces deux règles, suivant que, parmi les données du problème, figure la résistance du circuit extérieur ou la différence de potentiel aux bornes de ce circuit.

Exemples. — Supposons que l'on veuille grouper 100 éléments Bunsen, pour chacun desquels la force électromotrice est de 1,9 volt et la résistance de 0,24 ohm.

1° On donne la résistance du circuit extérieur : 5 ohms.

Nous égalons la résistance intérieure à la résistance extérieure. La résistance intérieure est $\frac{x^2 r}{n}$.

$$\frac{x^2 \times 0{,}24}{100} = 5$$

$$x = \sqrt{\frac{5 \times 100}{0{,}24}} = 45.$$

Le nombre d'éléments étant 100, il faut prendre le diviseur de 100 immédiatement supérieur à 45, c'est-à-dire 50. Nous aurons ainsi 50 éléments en tension et 2 en quantité.

2° On donne la différence de potentiel qu'il faut avoir aux bornes du circuit extérieur : 47 volts.

Nous écrirons que la force électromotrice de la pile est double de cette différence de potentiel.

$$x \times 1{,}9 = 2 \times 47$$
$$x = 49.$$

Nous prendrons 50 éléments en série et 2 en quantité.

152. — Considérons maintenant le cas plus général où le nombre d'éléments de la batterie *n'est pas déterminé* à l'avance.

Combien doit-on prendre d'éléments d'une pile, dont on connaît la force électromotrice e et la résistance r, et comment faut-il les grouper pour avoir un courant d'intensité I dans un circuit extérieur de résistance R ?

Soient x le nombre d'éléments en tension et y en quantité.

Le nombre total n est donné par

$$n = xy. \qquad (1)$$

Nous avons encore pour la valeur de l'intensité I

$$I = \frac{nex}{nR + rx^2}. \qquad (2)$$

Nous ne pouvons plus raisonner sur cette équation comme nous

l'avons fait plus haut. L'intensité I, en effet, est supposée donnée et nous n'avons pas à chercher son maximum. Ce qu'il faut trouver, c'est le minimum de n. Nous tirons de l'équation précédente

$$n = \frac{Irx^2}{ex - IR}.$$

Dans cette expression, x varie seul. Pour avoir la valeur de x qui la rend minima, égalons à 0 la dérivée par rapport à x :

$$2\,Irx\,(ex - IR) - eIrx^2 = 0$$

d'où

$$R = \frac{1}{2} \times \frac{xe}{I}.$$

$\frac{xe}{I}$ est le quotient de la force électromotrice par l'intensité ou la résistance totale du circuit. Donc, comme dans le cas précédent, la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure.

En répétant le raisonnement tenu plus haut, nous arriverons à la conclusion déjà trouvée que la force électromotrice de la pile doit être égale au double de la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur.

Nous avons donc encore les deux règles précédemment établies.

Exemple. — Supposons qu'on veuille obtenir, dans un circuit ayant 5 ohms de résistance, un courant de 8 ampères, avec des piles Bunsen possédant une force électromotrice de 1,9 volt et une résistance de 0,24 ohm.

Égalons la résistance intérieure à la résistance extérieure :

$$\frac{x \times 0{,}24}{y} = 5. \qquad (3)$$

Nous pourrions, avec les équations (1), (2), (3), déterminer les trois inconnus x, y, n. La remarque suivante simplifie le calcul.

Nous avons l'intensité I et la résistance du circuit extérieur R : nous pouvons en déduire immédiatement la différence de potentiel aux bornes, qui est égale à leur produit IR ou, dans l'exemple que nous étudions, à $8 \times 5 = 40$.

Écrivons que cette différence de potentiel est la moitié de la force électromotrice de la pile :

$$x \times 1{,}9 = 2 \times 40$$
$$x = 42.$$

En portant cette valeur dans l'équation (3)

$$y = \frac{42 \times 0,24}{5} = 2$$

Par suite $n = 84$.

Règle. — Connaissant la résistance du circuit extérieur et l'intensité du courant, on fait leur produit qui donne la différence de potentiel aux bornes et l'on écrit que :

1° La résistance du circuit extérieur est égale à la résistance de la pile;

2° La différence de potentiel aux bornes est égale à la moitié de la force électromotrice de la pile.

153. — Au lieu de l'intensité et de la résistance du circuit extérieur, on peut donner l'intensité et la différence de potentiel aux bornes de ce circuit.

Le raisonnement et la méthode à suivre sont identiques à ceux du paragraphe précédent, avec cette seule différence que l'on calcule immédiatement, non plus la différence de potentiel aux bornes, mais la résistance du circuit extérieur. L'opération est d'ailleurs très simple : il suffit de prendre le quotient de la différence de potentiel par l'intensité.

La règle est la suivante :

Règle. — Connaissant l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur, on fait le quotient de cette dernière par la première, ce qui donne la résistance du circuit extérieur, et l'on écrit que :

1° La résistance du circuit extérieur est égale à la résistance de la pile.

2° La différence de potentiel aux bornes est égale à la moitié de la force électromotrice de la pile.

1er *exemple.* — Supposons qu'on veuille obtenir dans un circuit extérieur ayant une différence de potentiel aux bornes de 40 volts, un courant de 8 ampères, avec des piles Bunsen possédant une force électromotrice de 1,9 volt et une résistance de 0,24 ohm.

La résistance du circuit extérieur sera $\frac{40}{8}$ ou 5 ohms. Nous écrirons donc :

$$\frac{x \times 0,24}{y} = 5$$

$$x \times 1,9 = 2 \times 40;$$

ce qui nous donne

$$x = 42 \qquad y = 2 \qquad n = 84.$$

2e *exemple.* — Combien faudra-t-il prendre d'éléments Bunsen, dont les constantes sont $e = 1,9$ volt et $r = 0,24$ ohm, pour alimenter 20 lampes à incandescence Edison de 8 bougies? Ces lampes exigent chacune 50 volts et 0,75 ampère, et elles sont toutes placées en dérivation.

Les lampes étant toutes en dérivation, l'intensité totale sera

$$I = 20 \times 0,75 = 15 \text{ ampères.}$$

La différence de potentiel aux bornes est de 50 volts. Donc la résistance du circuit extérieur est $\frac{50}{15} = 3,33$ ohms. Nous écrirons par suite :

$$\frac{x \times 0,24}{y} = 3,33$$

$$x \times 1,9 = 2 \times 50$$

d'où

$$x = 52,6$$
$$y = 3,7$$

Nous prendrons 53 éléments en série et 4 en quantité, en tout 212 éléments.

154. — Dans les exemples que nous venons d'examiner, le seul travail du courant consiste à vaincre la résistance du conducteur. Le raisonnement n'est plus tout à fait le même si le courant doit opérer une action électrolytique.

Connaissant la force électromotrice des éléments e, leur résistance r, combien faut-il en prendre et comment doit-on les grouper pour décomposer par seconde et dans les meilleures conditions un poids donné d'une solution saline?

Dans ce problème, il y a deux points bien distincts à considérer :

1° La résistance R que le bain oppose au passage de l'électricité;

2° La force E de polarisation que la pile doit vaincre pour décomposer le sel qui forme la solution.

Le problème ne peut donc pas être résolu comme ceux que nous avons indiqués précédemment.

Appelons y le nombre d'éléments en quantité et x en tension, et soit n le nombre total. Nous avons :

$$xy = n. \tag{4}$$

Soit Q l'équivalent électro-chimique du métal, c'est-à-dire le nombre de grammes de ce métal mis en liberté par 1 coulomb; un courant d'intensité I déposera par seconde un poids égal à QI. Appelons P ce poids :

$$QI = P. \tag{5}$$

Soit N le nombre de calories (gramme-degré)[1] absorbées par la mise en liberté de 1 gramme de métal. La chaleur résultant du dépôt du poids P sera PN ou QIN, et le travail correspondant

$$QIN \times 0{,}424 \text{ kilogrammètre.}$$

D'autre part le travail électrique est exprimé par $\frac{EI}{9{,}81}$.

En égalant ces deux expressions, on obtient :

$$QIN \times 0{,}424 = \frac{EI}{9{,}81};$$

d'où

$$E = 4{,}16 \times QN. \tag{6}$$

Dans la formule (a), § 151, qui nous donne l'intensité, la force électromotrice de la pile doit être diminuée de la force E de sens contraire opposée par la polarisation du sel qu'il s'agit de décomposer.

Le numérateur deviendra donc $xe - E$.

La résistance de la pile est $\frac{rx^2}{n}$.

[1] L'unité de masse adoptée dans le système C G S étant le *gramme*, on ne peut plus employer dans les calculs de ce genre la calorie ordinaire, § 46, qui correspond au kilogramme. On se sert de la *calorie-gramme-degré*, c'est-à-dire de la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un *gramme* d'eau.

Donc l'intensité est donnée par :

$$I = \frac{xe - E}{R + \frac{rx^2}{n}} = \frac{nxe - nE}{nR + rx^2}.$$

I étant donnée par l'équation (5), nous n'avons pas à en chercher le maximum. Ce qu'il faut trouver, c'est le minimum de n. Résolvons l'équation précédente par rapport à n :

$$n = \frac{Irx^2}{xe - E - IR}. \tag{7}$$

Dans cette expression, x varie seul. Pour avoir le minimum, égalons à 0 la dérivée par rapport à x :

$$2\,Irx\,(xe - E - IR) - eIrx^2 = 0$$
$$xe = 2\,(E + IR). \tag{8}$$

Nous avons ainsi 5 équations (4) (5) (6) (7) (8) qui nous permettent de calculer les 5 inconnues x, y, n, I, E.

Il nous reste maintenant à traduire cette dernière formule. Le courant a, en traversant le bain, deux opérations différentes à effectuer. Il doit : 1° surmonter la force de polarisation du bain, ce qui exige E volts; 2° vaincre la résistance que le bain offre comme conducteur, ce qui demande IR volts. Donc E + IR représente la différence de potentiel qu'il faut avoir aux bornes du bain.

Nous arrivons donc à cette conclusion que la différence de potentiel aux bornes doit encore être égale à la moitié de la force électromotrice de la pile.

Mais il n'est plus vrai que les résistances intérieure et extérieure sont égales ; cela tient à l'action électrolytique qui se passe dans le bain.

Exemple. — Supposons qu'on veuille déposer 3 milligrammes de cuivre par seconde dans un bain de sulfate de cuivre, dont la résistance spécifique est 46. La surface des électrodes est supposée de 10.000 centimètres carrés, leur distance 5 centimètres. La pile est formée d'éléments Bunsen pour lesquels on a : $e = 1,9$; $r = 0,24$. Nous supposons que les électrodes sont insolubles dans le bain.

L'équivalent électro-chimique du cuivre est Q = 0,00033.

La résistance spécifique de la solution de sulfate étant 46, la résistance opposée par le bain sera $\frac{46 \times 5}{10000} = 0,023 = R$. Le nombre de calories N (gramme-degré) dégagées par la combinaison de 1 gramme de cuivre est 932.

En appliquant les équations (4) (5) (6) (8), nous obtenons :

$$xy = n$$

$$I = \frac{0,003}{0,00033} = 9 \text{ ampères}$$

$$E = 4,16 \times 0,00033 \times 932 = 1^{\text{volt}},28$$

$$x \times 1,9 = 2\,(1,28 + 9 \times 0,023)$$

d'où

$$x = 1,5 \quad \text{soit } 2.$$

Substituons dans (7)

$$n = \frac{9 \times 0,24 \times 4}{2 \times 1,9 - 1,28 - 9 \times 0,023} = \frac{8,64}{2,31} = 3,7.$$

Soit $n = 4$.

Il faudra donc 4 éléments, dont 2 en série et 2 en quantité.

155. Choix des piles suivant le travail à produire. — Toutes les piles ne peuvent pas être prises indifféremment pour produire un certain travail. En passant ces appareils en revue, nous avons montré quels sont leurs inconvénients et leurs avantages respectifs. Nous allons les résumer en quelques mots et indiquer les systèmes qu'on doit choisir de préférence dans chaque cas particulier.

Pour la lumière électrique, il faut prendre plutôt les piles du genre Bunsen et les piles au bichromate, à cause de leur grande force électromotrice; mais les dégagements de vapeurs nitreuses qui se produisent avec la pile Bunsen interdisent son emploi dans les habitations. Les piles au bichromate sont plus pratiques; celle de Trouvé est commode pour de petits éclairages, parce qu'elle est d'une manœuvre assez facile. En outre, on peut régler la lumière à volonté d'après le degré d'immersion des électrodes et arrêter complètement le travail de la pile quand on le désire. Mais, dans ce genre d'applications, les piles entraînent à des dépenses fort élevées; les machines électriques seules peuvent donner des résultats économiques, comme nous le verrons dans l'étude de la lumière.

Pour la dorure, l'argenture, le cuivrage, il faut employer les éléments Daniell et Bunsen. Ils fournissent un courant assez continu et leur entretien est moins coûteux que celui des autres systèmes. Les piles du genre Callaud ne sont guère applicables, à cause de l'immobilité qui leur est nécessaire. Celles du système Leclanché ne conviennent pas non plus, parce qu'elles ne peuvent, comme nous l'avons vu, fournir un travail suivi.

Pour la télégraphie et la téléphonie, où les piles n'ont pas besoin de travailler d'une façon continue, on emploie les éléments Daniell, Callaud, Meidinger, Leclanché, de Lalande et Maiche. Nous avons déjà dit que les piles Callaud et Meidinger sont très usitées en Allemagne et en Russie pour cet usage. En France, on se sert beaucoup du système Leclanché. Ces éléments peuvent durer fort longtemps avec très peu d'entretien.

Pour les sonneries domestiques, les signaux et les appels de toutes sortes, les éléments Leclanché, de Lalande, Maiche, et les piles au sulfate de mercure sont très adoptés. Les éléments du genre Callaud exigent trop de précautions.

Pour les expériences de laboratoire, les usages médicaux, les piles au bichromate, celles au chlorure d'argent rendent de grands services. Pour cet emploi, on vise, en effet, moins l'économie que la commodité et l'on cherche des appareils dont on puisse régler facilement la marche.

Les piles thermo-électriques sont assez employées dans les laboratoires d'essais; elles consomment, il est vrai, une quantité de gaz considérable; mais elles ont l'avantage que, pour les faire fonctionner, il suffit d'ouvrir un robinet et qu'elles permettent de réunir sous un petit volume un grand nombre d'éléments. Elles sont aussi utiles dans certaines opérations galvanoplastiques dont la délicatesse exige la constance à peu près absolue du courant.

156. Calcul de la force électromotrice d'un élément de pile. — Les considérations que nous avons développées § 148, sur le travail chimique des piles et sur la quantité de chaleur produite par la combinaison des corps qui les composent, nous donnent le moyen de calculer théoriquement la force électromotrice d'un élément de

pile, quand on connaît les réactions qui s'y produisent. Nous empruntons aux travaux de M. Reynier et de M. H. Fontaine la méthode suivante qui permet de résoudre le problème d'une façon fort simple.

Pour cela, reportons-nous aux équivalents électrochimiques que nous avons définis § 73. Rappelons que la quantité d'hydrogène mise en liberté par un coulomb traversant un électrolyte est égale à $0^{gr},000010384$, et que l'équivalent électrochimique d'un corps, c'est-à-dire le poids de ce corps mis en liberté par un coulomb, est égal à $0,000010384\ h$ (h étant l'équivalent chimique du corps par rapport à l'hydrogène). Réciproquement, pour produire un coulomb, il faudra faire entrer en action un poids de ce corps égal à $0,000010384\ h$. Cherchons le travail correspondant.

Soit C le nombre de calories (kilogramme-degré) que comporte la combinaison d'un équivalent chimique du corps considéré ; pour une quantité de ce corps égale à $0,000010384\ h$, la chaleur produite sera $0,000010384 \times C$, et le travail correspondant en kilogrammètres $0,000010384 \times C \times 424$.

Or, nous avons vu § 44 que le travail produit par un courant est donné par la formule :

$$T = \frac{xQ}{g},$$

dans laquelle T exprime des kilogrammètres, x des volts et Q des coulombs et g l'accélération de la pesanteur.

Supposons $Q = 1$; il vient

$$T = \frac{x}{g}.$$

C'est le travail produit par un coulomb, ou réciproquement, celui qu'il faut dépenser dans une réaction chimique pour obtenir un coulomb.

Egalons les deux expressions de ce travail :

$$\frac{x}{g} = 0,000010384 \times C \times 424.$$

D'où l'on tire :

$$x = 0,043 \times C \text{ volts.} \qquad (1)$$

Cette formule nous permet de calculer la force électromotrice d'un élément de pile en partant de la quantité de chaleur produite par les réactions qui y prennent naissance. La difficulté est de préciser exactement les réactions, et de bien distinguer celles qui concourent à la production de la chaleur et les actions secondaires qui, au contraire, en absorbent inutilement une certaine quantité. Nous donnons à la fin du volume un tableau indiquant les chaleurs de formation des principaux composés.

Exemples. — *Pile de Volta.* — Nous avons vu dans le § 148 que les réactions intervenant dans cette pile sont la décomposition d'un équivalent d'eau qui absorbe 34,45 calories, et la formation d'un équivalent de sulfate de zinc qui produit 53,25 calories.

La quantité de chaleur C disponible est donc égale à 18,80 calories ; si nous appliquons la formule (1), nous aurons :

$$x = 0{,}043 \times 18{,}80$$
$$x = 0{,}8 \text{ volt.}$$

Pile Daniell. — Les réactions intervenant directement sont la décomposition d'un équivalent de sulfate de cuivre qui absorbe 29,60 calories, et la formation d'un équivalent de sulfate de zinc qui produit 53,25 calories.

La quantité de chaleur qui en résulte est donc de 23,65 calories et nous avons :

$$x = 0{,}043 \times 23{,}65$$
$$x = 1{,}01 \text{ volt.}$$

157. Calcul théorique du prix de revient des piles. Prix du cheval-heure. — En s'appuyant sur les mêmes considérations, on peut calculer théoriquement les poids de réactifs consommés dans une pile pour produire un certain travail, le cheval-heure par exemple ou 270 000 kilogrammètres.

Le travail fourni par le courant est donné par

$$T = \frac{EQ}{g},$$

T représentant des kilogrammètres, E des volts et Q des coulombs. Pour 1 cheval-heure on a :

$$270\,000 = \frac{EQ}{g}$$

d'où

$$Q = \frac{2\,648\,700}{E}.$$

Soit h l'équivalent chimique du corps considéré et n le nombre d'équivalents engagés dans la réaction.

Un coulomb met en liberté un poids égal à $0{,}000010384 \times h \times n$ grammes.

Donc, pour une quantité de coulombs égale à $\frac{2\,648\,700}{E}$, le poids libéré sera :

$$P = 0{,}000\,010\,384 \times h \times n \times \frac{2\,648\,700}{E}$$

$$P = 27{,}50 \times \frac{h \times n}{E} \text{ grammes.} \qquad (2)$$

En appliquant cette formule à tous les réactifs qui entrent dans une pile et en remplaçant h et n par les chiffres correspondants, on établira facilement le prix théorique du cheval-heure.

Il faut remarquer que, d'après la manière dont elle a été établie, cette formule nous donne l'énergie totale fournie par la pile. Si l'on désire connaître le prix du cheval-heure utilisable dans le circuit extérieur, il faut tenir compte du travail absorbé par la résistance même de la pile, et, au lieu de la force électromotrice E de l'élément, mettre dans la formule la différence de potentiel aux bornes. La valeur de P se trouvera ainsi plus grande.

Il faut toujours faire attention aux actions locales de la pile, qui ont une très grande importance. C'est là ce qui complique beaucoup le problème et en rend l'application peu pratique. Ces calculs peuvent être cependant fort utiles, en ce sens qu'ils fournissent des limites qui servent à contrôler les résultats de l'expérience.

En multipliant par 2,5 les chiffres donnés par le calcul théorique précédent, on obtient la dépense réelle avec une approximation suffisante.

Exemple. — Soit à calculer le prix de revient du cheval-heure dans la pile Daniell.

La force électromotrice est $1^{\text{volt}},01$.

Pour avoir le zinc consommé, remplaçons dans la formule (2)

h par 32,7, qui est l'équivalent chimique du métal, et n par 1 qui est le nombre d'équivalents engagés dans la réaction :

$$P = 27{,}50 \times \frac{32{,}7 \times 1}{1{,}01} = 890 \text{ grammes},$$

ce qui, au prix de 0 fr. 60 le kilogramme, représente 0 fr. 53.

Pour le sulfate de cuivre (SO^3CuO), remplaçons h par 79,8 et n par 1 :

$$P = 2\,172 \text{ grammes}.$$

Nous avons raisonné en supposant pour formule au sulfate de cuivre $SO^3\,CuO$, tandis que la formule du sulfate cristallisé est $SO^3\,CuO + 5\,HO$. Nous avons donc à ajouter à P le poids de l'eau de cristallisation donné par :

$$\frac{5 \times 9 \times 2\,172}{79{,}8} = 1\,225 \text{ grammes};$$

le poids de sulfate dépensé sera donc de 3 397 grammes; au prix de 0 fr. 70 le kilogramme, il coûtera 2 fr. 38.

Il faut déduire de là le cuivre récupéré. En remplaçant h par 31,8 équivalent du cuivre, et n par 1, la même formule nous donne

$$P = 866 \text{ grammes}.$$

Au prix de 1 fr. 20 le kilogramme nous avons 1 fr. 03 de cuivre.

La dépense totale théorique sera donc

$$0{,}53 + 2{,}38 - 1{,}03 = 1 \text{ fr. } 88.$$

Pour avoir la dépense pratique, il faut multiplier par 2,5 le chiffre donné par la théorie ; on arrive ainsi à 4 fr. 70.

Les calculs ci-dessus sont absolument théoriques. Nous ne les avons indiqués que pour montrer la marche à suivre dans ce genre de problème, mais il existe une très grande différence entre les chiffres résultant du calcul et ceux que fournit la pratique.

Note. — Nos lecteurs trouveront en appendice un tableau indiquant les forces électromotrices des principales piles. Nous ne pouvons en indiquer les résistances; car, ainsi que nous l'avons vu, cette donnée varie, dans des proportions très considérables, suivant la dimension et la forme des éléments et selon l'état de concentration des liquides qui entrent dans leur composition.

CHAPITRE II

MACHINES ÉLECTRIQUES

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

158. — Les machines électriques reposent toutes sur l'emploi des courants d'induction découverts en 1831 par Faraday, courants dont le principe peut, comme nous l'avons vu § 31, s'énoncer de la manière suivante : Lorsqu'on fait mouvoir dans un champ magnétique un conducteur faisant partie d'un circuit fermé, de façon à modifier le nombre des lignes de force magnétiques qui le coupent, ce conducteur devient le siège d'un courant électrique induit.

Le sens de ce courant peut être déterminé au moyen d'une règle analogue à celle d'Ampère. Supposons un observateur couché sur le conducteur de manière à regarder suivant la direction positive des lignes de force, cette direction étant prise du pôle Nord vers le pôle Sud. Si le mouvement du conducteur a lieu vers la droite de l'observateur, le courant entrera par ses pieds et sortira par sa tête ; si le mouvement a lieu vers la gauche, le courant entrera par sa tête et sortira par ses pieds.

Cette règle peut encore s'énoncer de la manière suivante : Supposons un observateur couché sur le conducteur de façon que le mouvement ait lieu vers sa droite. Le courant induit entrera par les pieds et sortira par la tête, si cet observateur se trouve tourné vers la direction positive des lignes de force, cette direction étant prise du pôle Nord vers le pôle Sud. Il entrera par la tête, s'il regarde dans la direction négative.

La cause à laquelle est dû ce courant induit est facile à comprendre. Pour déplacer le conducteur dans le champ magnétique, on est en effet obligé de dépenser une certaine quantité de travail mécanique, comme le prouve la résistance que l'on rencontre. Ce travail se transforme en énergie électrique, et c'est lui qui produit le courant d'induction.

La machine électrique, qui n'est pas autre chose qu'un appareil dans lequel des conducteurs traversent rapidement un champ magnétique, est donc une machine destinée à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, par la rotation dans un champ magnétique de conducteurs faisant partie d'un circuit fermé.

Il est, toutefois, juste de dire que, si les principes sur lesquels sont fondées les machines électriques sont connus depuis longtemps, leur découverte excita peu d'intérêt au moment où elle eut lieu. L'armature de Siemens (1856), l'anneau de Pacinotti (1861), le principe de l'auto-excitation (1867) ne furent publiés par leurs auteurs qu'au point de vue purement scientifique. Personne n'osait appliquer ces principes dans la pratique : M. Gramme fit le premier cet essai et sa réussite fut complète.

159. Description de l'anneau Gramme. — Prenons un anneau en fer doux (fig. 88) sur lequel est enroulé en spirale un fil de cuivre. (La forme de cet anneau a été un peu modifiée sur la figure pour la commodité de la démonstration ; mais le raisonnement n'en est aucunement changé.) Plaçons cet anneau entre deux pôles magnétiques N, S. Il s'aimantera par influence et prendra des pôles magnétiques S′, N′, qui seront respectivement de noms contraires à ceux des pôles inducteurs devant lesquels ils se trouveront.

Supposons maintenant que l'on fasse tourner l'anneau dans le sens indiqué par les flèches F. Les pôles S′, N′ se produiront toujours en regard des pôles N, S et resteront fixes dans l'espace ; les phénomènes seront donc les mêmes que si, cet anneau restant immobile, le fil de cuivre tournait seul sur le noyau métallique.

Considérons alors une portion *pt* de la spire dans le champ magnétique N S′, et appliquons la règle donnée précédemment pour déterminer le sens du courant induit.

Plaçons un observateur sur le fil les pieds en p, la tête en t, et tourné de manière que le mouvement ait lieu vers sa droite. Il regardera alors vers l'extérieur de l'anneau, et, par suite, dans la direction négative des lignes de force. Ainsi le courant entrera par la tête suivant la direction f.

Prenons maintenant la même spire, après lui avoir fait accomplir une demi-révolution, et faisons tourner l'observateur en même temps. Il aura les pieds en p', la tête en t', et regardera toujours vers l'extérieur de l'anneau. Mais dans cette position, la direction des lignes de force a changé, et l'observateur se trouvera tourné vers la direction positive. Le courant entrera donc par ses pieds suivant la flèche f'.

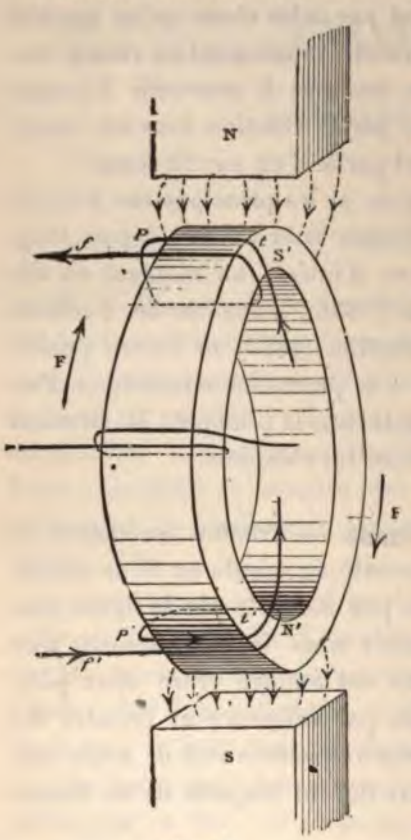


Fig. 88.

Les courants induits dans ces deux positions diamétralement opposées de la spire sont donc en sens contraire. Suivons la spire dans son mouvement. L'observateur regardant toujours vers l'extérieur de l'anneau, pour que le mouvement ait lieu vers sa droite, on voit de suite que le sens du courant induit se modifiera lorsque la direction des lignes de force changera par rapport à cet observateur. Or, les lignes de force vont de l'extérieur vers l'intérieur dans la demi-circonférence supérieure, et de l'intérieur vers l'extérieur dans la demi-circonférence inférieure. Leur direction change donc dans le plan horizontal perpendiculaire à la ligne des pôles NS, et le sens du courant induit se modifie aussi dans ce plan.

En résumé, la portion de spire est parcourue par un courant de

même sens pendant toute sa demi-révolution supérieure, et par un courant de sens contraire pendant sa demi-révolution inférieure. Naturellement, l'intensité de ce courant varie suivant la distance de la spire aux pôles ; elle atteint son maximum sur la ligne NS, tandis qu'elle est nulle dans le plan perpendiculaire à cette ligne. Ce plan a reçu le nom de *zone neutre*.

Le même phénomène se produit dans chaque tour de la même spire ; l'action se trouve donc multipliée par le nombre de tours constituant la torsade.

Si maintenant, au lieu de prendre une seule spire, nous considérons toutes celles qui, à un moment donné, sont dans la demi-circonférence supérieure, ces spires sont le siège de courants induits de même sens qui s'ajoutent et produisent un courant résultant égal à leur somme.

Le même phénomène se passera du reste dans les spires de la demi-circonférence inférieure, et celles-ci seront aussi parcourues par un courant égal à la somme des courants induits dans chacune d'elles. Ces deux courants résultants seront naturellement égaux et de sens opposés ; mais ils s'ajouteront dans le circuit extérieur P M, comme l'indique la figure 89.

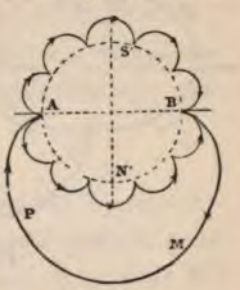


Fig. 89.

L'anneau ainsi combiné présente une disposition absolument semblable à celle de deux éléments identiques de pile réunis en quantité. Ces deux éléments se font équilibre et ne produisent aucun courant si l'on réunit simplement leurs pôles de mêmes noms, tandis qu'ils associent leurs actions lorsqu'on fait communiquer par un conducteur quelconque les points de jonction *a*, *b* (fig. 90).

Les courants induits dans chaque moitié de l'anneau Gramme sont recueillis de la même manière. On réunit les deux points situés dans la zone neutre par un conducteur extérieur où viennent converger les deux courants induits associés en quantité.

Il est utile de remarquer que l'anneau de fer doux sur lequel est enroulé le fil induit est absolument nécessaire à la marche de la machine Gramme et joue le rôle le plus important dans la production des courants. Comme l'ont démontré les expériences de

M. Isenbeck, la suppression de cet anneau de fer et son remplacement par un noyau en bois modifient complètement les résultats énoncés précédemment. Dans ce cas, les courants induits ne sont plus de même sens dans toute l'étendue de chaque demi-circonférence. Ils sont au contraire de deux sens différents, et leurs changements de signes s'effectuent assez brusquement de chaque côté et à environ 10° de la ligne des pôles magnétiques, ainsi que sur la ligne neutre perpendiculaire à la ligne des pôles.

160. Collecteur. — Nous venons de voir que le mouvement de rotation de l'anneau produit deux courants électriques qu'on recueille associés en quantité, en réunissant par un conducteur extérieur les deux points de l'hélice induite situés dans la zone neutre. Mais, par suite du mouvement même de cette hélice, il était impossible de recueillir ces courants directement; il a fallu avoir recours à un dispositif particulier, qui est le *collecteur* de la machine Gramme.

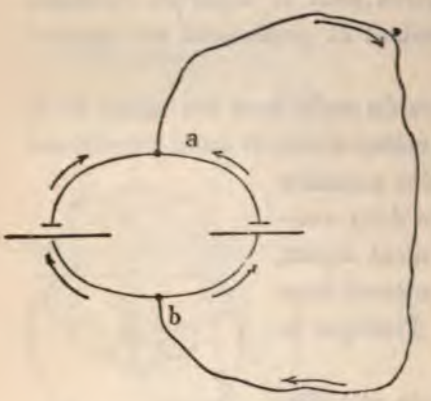


Fig. 90.

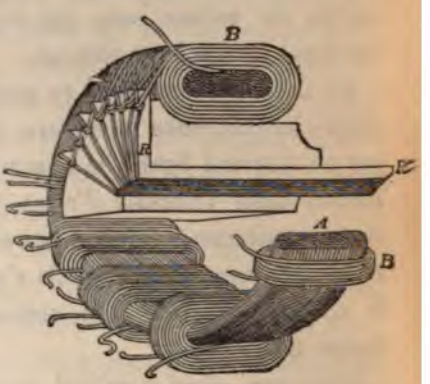


Fig. 91.

Le fil induit qui couvre l'anneau se trouve partagé en sections ou bobines distinctes, placées à côté les unes des autres et réunies en tension, le bout finissant de l'une étant soudé au bout commençant de la suivante. (Afin de rendre la construction de cet organe plus intelligible, l'anneau a été décomposé dans la figure 91 et la figure 92 indique la disposition schématique de l'appareil.) Ces

sections de fil forment, comme on le voit, dans leur ensemble, une bobine indéfinie.

L'arbre de rotation sur lequel est fixé l'anneau porte une série de lames de cuivre R, disposées de manière à former par leur ensemble un cylindre autour de l'arbre. Ce cylindre constitue le collecteur de la machine. Les lames sont en nombre égal à celui des bobines qui entourent l'anneau et elles sont isolées les unes des autres par des rubans de soie. A chaque bande de cuivre on attache le bout finissant d'une bobine et le bout commençant de la suivante. Une plaque sert donc de liaison entre deux bobines consécutives, et l'on conçoit aisément qu'en la touchant on reçoit le même courant que si le contact était fait avec les fils mêmes des bobines qui y aboutissent. Si donc on établit à poste fixe deux contacts sur les génératrices suivant lesquelles le plan de la ligne neutre vient couper le cylindre formé par les plaques, on recueillera en ces points le courant total produit par l'anneau entier.

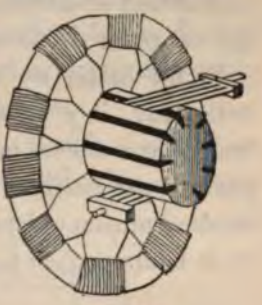


Fig. 92.

161. Balais. — La question se trouve donc réduite à celle-ci : toucher les deux lames du collecteur qui se trouvent dans la zone neutre. Pour la résoudre, il suffit de disposer, aux extrémités des diamètres situés dans cette zone, deux ressorts frotteurs métalliques qui appuient sur les cylindres dont nous venons de parler et procurent le contact avec les lames de cuivre. Ils recueillent le courant et le transmettent au conducteur extérieur qui leur est fixé.

Ces ressorts se composent d'un faisceau méplat de fils fins métalliques, en cuivre argenté par exemple, d'où le nom de *balais* qui leur a été donné. Depuis quelque temps, on emploie avec avantage des balais en toile métallique ; cette toile est formée de fils de cuivre de 0,12 millimètre de diamètre, et a un tissu très serré.

Les balais d'une dynamo sont analogues aux pôles d'une pile. Aussi leur donne-t-on le nom de balai ou pôle positif et de balai ou pôle négatif. On admet aussi que, comme pour la pile, le courant va, dans l'intérieur de la machine, du balai négatif au balai positif,

et dans le circuit extérieur, du balai positif au balai négatif.

Il est souvent nécessaire, comme nous le verrons plus loin, pour la charge des accumulateurs et les opérations galvanoplastiques, par exemple, de reconnaître le balai positif et le balai négatif d'une dynamo. Le moyen le plus simple consiste à relier chacun des balais à une lame métallique de fer, de zinc ou de plomb, et à plonger ces deux lames dans une dissolution de sulfate de cuivre. Cette dissolution se décompose et le cuivre vient se déposer sur la lame qui est reliée au balai négatif.

Si les balais ne touchaient réellement qu'une seule lame du collecteur, il y aurait interruption du courant chaque fois qu'ils frotteraient sur les rubans isolateurs. En pratique, les choses ne se passent pas ainsi, et les balais sont disposés pour toucher simultanément plusieurs lames voisines ; de cette façon, le contact subsiste et le courant n'est jamais interrompu complètement.

162. Machines magnéto et dynamo-électriques. — Dans tous les

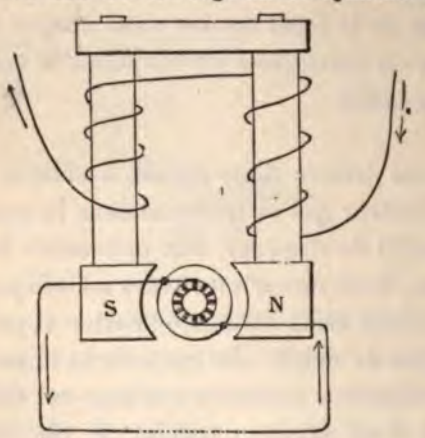


Fig. 93.

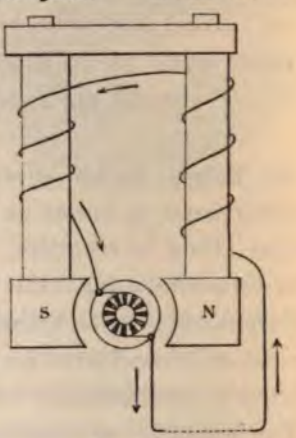


Fig. 94.

raisonnements qui précèdent, nous n'avons fait aucune hypothèse sur la constitution du champ magnétique dans lequel se meut l'anneau Gramme ; l'origine de sa force magnétisante est indifférente. Il en résulte que cette force peut provenir soit d'un aimant, soit d'un électro-aimant, d'où les deux classes suivantes de machines électriques :

Les machines *magnéto-électriques*, ou plus simplement les

magnétos, sont celles dans lesquelles le champ magnétique est produit par un aimant permanent.

Le nom de machines *dynamo-électriques* ou de *dynamos* a été donné au contraire à celles qui sont construites avec des électro-aimants. Elles ont sur les premières l'avantage de pouvoir fournir un champ magnétique beaucoup plus puissant.

163. Différents modes d'excitation. — Les machines dynamos se distinguent les unes des autres par le mode d'excitation de leur champ magnétique, suivant que cette excitation est produite par une machine séparée ou par la dynamo elle-même.

Dans le premier cas (fig. 93), la machine est dite *à excitation indépendante*. Cette disposition est utile dans certains systèmes

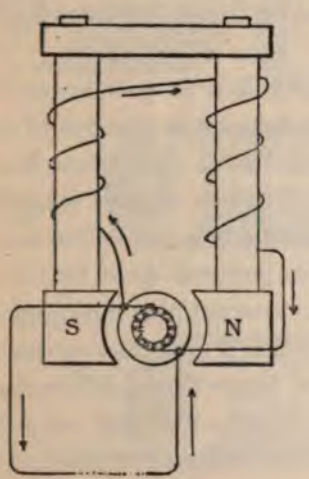


Fig. 95.

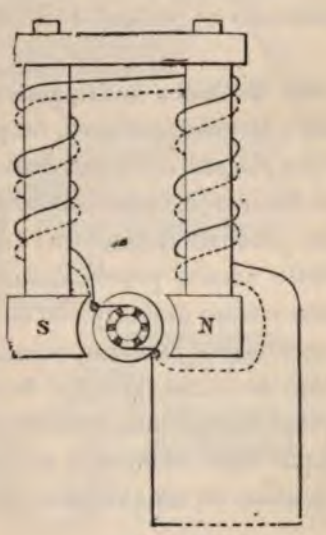


Fig. 96.

d'éclairage électrique, entre autres pour ceux qui exigent des courants alternatifs.

Le plus généralement, on a intérêt à produire l'excitation par la machine elle-même, qui est alors appelé *auto-excitatrice*. Si les électro-aimants inducteurs sont parcourus par le courant total (fig. 94), la machine est dite auto-excitatrice *à excitation en série ;* s'ils ne reçoivent qu'une simple dérivation du courant (fig. 95), la dynamo est *à excitation dérivée*. Ces deux systèmes peuvent

même être combinés de façon à donner une *excitation en double circuit* ou *compound* (fig. 96). Nous exposerons plus tard les avantages de ces différents systèmes.

Le principe de l'auto-excitation repose sur le magnétisme rémanent. Si le fer doux des électros était parfaitement pur et ne présentait pas de trace d'aimantation, le mouvement de l'anneau Gramme ne produirait aucun courant induit. Mais, au moment où ce mouvement commence, le fer doux possède un magnétisme rémanent qui donne naissance à un courant, très faible, il est vrai, mais suffisant pour commencer l'excitation des électros. Ceux-ci peuvent à leur tour agir sur la bobine, et il se produit ainsi une série de réactions successives qui augmentent l'intensité du courant jusqu'à ce qu'elle ait atteint sa valeur de régime. Ces opérations se passent d'ailleurs dans un temps infiniment petit.

164. Machines multipolaires. — Au lieu de prendre seulement deux pôles magnétiques, on peut en disposer un plus grand nombre en les plaçant deux par deux aux extrémités d'un même diamètre. Les bobines induites traversent les différents champs magnétiques ainsi produits et subissent dans chacun d'eux une action analogue à celle décrite précédemment. Elles peuvent donc être animées d'une vitesse moindre, ou donner un courant plus énergique si on leur conserve le même nombre de tours. Il faut dans ce cas mettre autant de balais qu'il y a de champs magnétiques différents, et la perte d'énergie qui, comme nous le verrons plus loin, se produit à chaque balai, compense en partie les avantages résultant de l'augmentation du nombre des pôles.

165. Machines à courant continu, à courants redressés et à courants alternatifs. — 1° *Machine à courant continu.* La disposition du collecteur de l'anneau Gramme permet de recueillir sur les balais un courant dont le sens est toujours le même, et qui ne subit pas d'interruption complète, par suite du fractionnement de l'induit en un grand nombre de bobines correspondant à autant de lames du collecteur. C'est ce qui a fait donner à la machine le nom de dynamo *à courant continu.*

2° *Machine à courants redressés.* Considérons au contraire un

anneau sur lequel il n'y a qu'une seule petite bobine. Le courant passera par zéro et changera de sens toutes les fois que la bobine traversera la ligne neutre. Il suffit donc d'un commutateur qui redresse ce courant deux fois par tour pour avoir dans le circuit extérieur un courant d'une allure assez variable, il est vrai, mais dirigé toujours dans le même sens. Les machines qui réalisent cette disposition sont dites *à courants redressés*.

On peut d'ailleurs prendre plusieurs bobines, comme nous le verrons plus loin dans la description des machines de cette classe.

3° *Machine à courants alternatifs*. Dans d'autres machines, enfin,

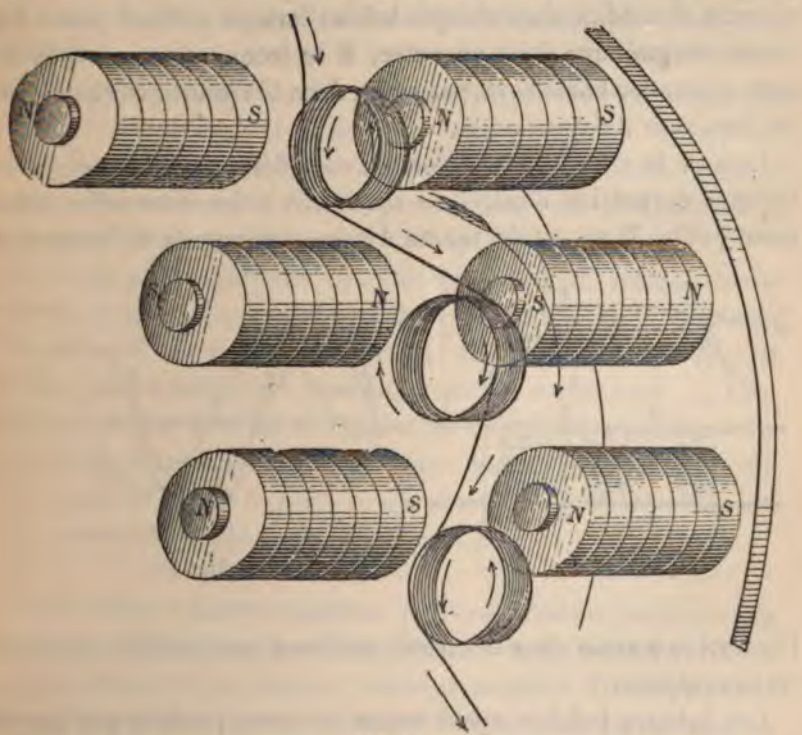


Fig. 97.

les courants sont pris tels qu'ils sont développés dans les bobines induites. Comme ils changent de sens dans chaque bobine au moment où celle-ci passe d'un champ magnétique dans un autre, le courant résultant se modifie aussi en même temps; il peut se trouver ainsi renversé jusqu'à 30 000 fois par minute. La dynamo

est alors dite *à courants alternatifs*. Nous allons exposer rapidement le principe de leur construction.

Les bobines induites sont placées sur la périphérie d'un disque et se meuvent entre les pôles opposés de deux séries d'électros (fig. 97). Ces pôles sont alternativement de noms contraires, de telle sorte que les lignes de force de deux champs magnétiques successifs ont des directions opposées. Le courant induit est donc de sens contraire dans deux bobines successives, et l'on arrive à associer les actions de ces différents courants en réunissant les bobines ainsi que l'indique la figure. De plus, comme le sens du courant se modifie dans chaque bobine lorsque celle-ci passe d'un champ magnétique dans un autre, il se trouve changer à la fois dans toutes les bobines et, par suite, dans le circuit extérieur entre les balais où il est recueilli.

Comme la vitesse de rotation est considérable, les passages des bobines devant les électros se succèdent à des intervalles infiniment petits. Il en est de même des renversements du courant, et

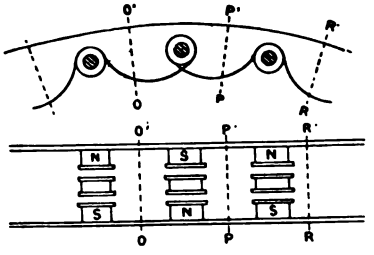


Fig. 98.

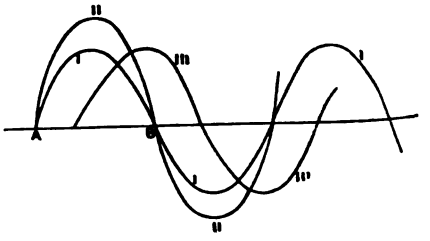


Fig. 99.

l'on arrive à avoir dans le circuit extérieur des courants alternatifs très multipliés.

Les bobines induites ayant toutes la même position par rapport aux bobines inductrices, l'une quelconque d'entre elles est soumise aux mêmes réactions que chacune des autres. Il suffit donc d'analyser ce qui se passe dans l'une des bobines pour comprendre le fonctionnement de la machine.

Considérons une bobine induite au moment où elle se trouve sur la ligne neutre OO′ (fig. 98) de deux champs magnétiques voisins : la force électromotrice induite est nulle. La bobine se déplaçant,

la force augmente et atteint sa valeur maxima lorsqu'elle se trouve sur la ligne des pôles S N ; à partir de ce moment, elle décroît pour devenir nulle en PP'. Le mouvement continuant, les mêmes phénomènes se passent entre PP' et RR' ; mais, les lignes de force y étant de sens contraire, le courant induit est lui-même de signe contraire.

La variation de la force électromotrice peut se représenter graphiquement, en portant les valeurs du temps sur l'axe des abscisses. On obtient pour la force électromotrice une sinusoïde analogue à celle de la figure 99.

Ce qui précède nous permet de définir certaines expressions que nous retrouverons dans les machines et moteurs à courants alternatifs.

On appelle *période* l'intervalle de temps compris entre les passages d'une bobine induite en deux points du champ où la force électromotrice a deux valeurs égales et de même signe, et *fréquence* le nombre de périodes par seconde. Sur la figure 99 la longueur AB représente la moitié de la période.

On dit, par suite, que deux courants alternatifs ont même période ou même *phase* lorsque leurs périodes sont égales. Ces phases égales peuvent de plus coïncider ou non ; les courbes I et II (fig. 99) représentent deux courants à phases coïncidant. Au contraire les courbes I et III se rapportent à deux courants dont les phases sont discordantes ; on dit alors que le courant III a un *retard de phase* sur le courant I, ou encore qu'il est *décalé* d'une certaine quantité de phase sur le courant I.

166. Machines à électros mobiles. — Nous n'avons parlé jusqu'à présent que de machines dans lesquelles les électro-aimants inducteurs sont fixes et les bobines induites mobiles. Dans certaines dynamos, la construction est inverse, et ce sont les inducteurs qui reçoivent le mouvement de rotation.

Cette disposition ne change naturellement rien à la théorie de l'appareil ; il y a toujours mouvement relatif des électros et des bobines, et c'est là la seule condition nécessaire au développement des courants induits. Les inventeurs qui ont adopté ce système croient simplifier la construction de leurs machines, en évitant les collecteurs et les balais qui ne se trouvent plus nécessaires.

L'amélioration, si toutefois elle existe, n'est pas dans tous les cas considérable.

Certains électriciens ont imaginé de donner aux deux disques qui portent les électros et les bobines des mouvements opposés de rotation, ce qui permet de diminuer de moitié la vitesse de chacun d'eux. Cette idée n'a pas encore été appliquée pratiquement.

Enfin d'autres inventeurs ont laissé l'inducteur et l'induit fixes; la seule pièce mobile est le noyau de l'induit, dont la rotation fait varier constamment l'orientation du champ magnétique dans lequel se trouve l'induit. Cette disposition permet de supprimer le collecteur et les balais, mais elle n'a pas encore donné des résultats pratiques très concluants.

167. Réversibilité des machines électriques. — A part quelques dynamos à courants alternatifs, les machines électriques jouissent d'une propriété fort importante sur laquelle est basée la transmission de la force. Elles sont *réversibles*, c'est-à-dire qu'elles peuvent transformer indifféremment le travail mécanique en énergie électrique ou l'énergie électrique en travail mécanique.

Nous venons de voir qu'en donnant à l'anneau Gramme un mouvement de rotation, on produisait un courant électrique. Réciproquement, si l'on envoie un courant dans cet anneau, il se mettra à tourner spontanément. Si ce courant est assez énergique, l'anneau pourra même entraîner dans son mouvement un outil quelconque et produire un travail mécanique utilisable.

C'est de cette expérience qu'a été déduite la transmission électrique de la force. Il suffit en effet de relier deux dynamos par un conducteur métallique et de faire tourner l'une d'elle placée à l'endroit où l'on dispose de la force motrice. On produit ainsi un courant qui traverse la seconde dynamo et lui communique un mouvement de rotation sur le lieu même où le travail doit être utilisé. On ne retrouve naturellement pas toute l'énergie dépensée au point de départ, et il y a des pertes qui varient avec les conditions de l'expérience. Nous étudierons cette question en détail dans un des chapitres suivants. Nous pouvons toutefois déjà indiquer les noms donnés aux deux machines. La dynamo qui engendre le

courant est appelée *génératrice ;* celle qui le reçoit et produit une force mécanique est nommée *réceptrice.*

Cette réversibilité n'est pas difficile à expliquer et, pour la comprendre, on n'a qu'à se reporter aux lois d'attraction et de répulsion qui déterminent les actions réciproques de deux courants ou d'un courant et d'un pôle magnétique, dont l'un est fixe et l'autre mobile.

168. Lois de l'action des machines électriques. — Les machines électriques, employées comme générateurs d'électricité, sont soumises aux lois suivantes qui ne sont autres que les lois générales de l'induction (31 à 37) :

1° La force électromotrice induite est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique ;

2° Elle est proportionnelle à la longueur du fil des bobines induites ;

3° Elle augmente avec la vitesse de rotation.

169. Influence de la vitesse. — Lorsqu'il s'agit d'une machine dans laquelle l'intensité du champ magnétique reste constante, magnéto ou dynamo à excitation indépendante, la force électromotrice est sensiblement proportionnelle à la vitesse.

Il est évident que cette proportionnalité ne se maintient pas indéfiniment, mais elle a été constatée à des vitesses de 3 000 tours, et l'on peut l'admettre en pratique.

Dans les machines auto-excitatrices, la loi est différente. Une augmentation de vitesse produit une augmentation du courant ; mais cette influence se fait aussi sentir dans les électros et y occasionne un accroissement à peu près proportionnel de l'intensité du champ magnétique. Ce dernier réagit à son tour sur le courant, de telle sorte que, finalement, la force électromotrice devrait être sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse.

Cela n'est pas en réalité, à cause de certaines actions perturbatrices qui augmentent avec la vitesse et dont nous parlerons plus loin.

La proportionnalité au carré de la vitesse ne peut d'ailleurs exister que si le magnétisme du fer des électros n'est pas voisin de son point de saturation, ce qui se présente d'ailleurs presque toujours dans la pratique.

Somme toute, la condition essentielle du bon fonctionnement d'une dynamo est que la vitesse de rotation soit absolument uniforme, afin que le courant reste lui-même constant. C'est là la raison pour laquelle on doit apporter de grands soins dans les installations où l'on emploie les moteurs à gaz pour commander les machines électriques.

On a encore intérêt à augmenter la vitesse de la dynamo ; mais il existe naturellement une limite qu'on ne peut dépasser en pratique et qui varie avec la construction de la machine, le poids de la partie mobile, etc... Il y a aussi une vitesse minima au-dessous de laquelle la machine ne fonctionne pas. Ces différentes limites sont particulières à chaque appareil et varient suivant son modèle et sa construction.

170. Construction des électro-aimants. — La force électromotrice induite étant proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, celui-ci doit être aussi puissant que possible. C'est ce qui a fait remplacer par des électros les aimants permanents précédemment employés.

Certains électriciens ont prétendu, il est vrai, que les bobines de ces électros consommant une certaine partie du courant, il n'y avait pas économie à faire cette substitution ; mais, à pouvoir égal les aimants coûtent beaucoup plus cher à construire ; ils ont en outre besoin d'être réaimantés de temps en temps. D'un autre côté, l'emploi d'électros permet de faire varier l'intensité du champ magnétique de la machine et, par suite, de proportionner le courant à la puissance nécessaire sur le circuit extérieur, ainsi que nous le verrons plus loin. En résumé, bien que les électros nécessitent une dépense d'électricité pour l'excitation du champ magnétique, ils sont encore d'un emploi plus avantageux sous tous les rapports. Aussi les machines magnétos, qui ont précédé les dynamos de plusieurs années, sont-elles presque complètement abandonnées dans l'industrie ; on ne les applique guère que pour quelques cas tout à fait spéciaux.

Nous allons énumérer rapidement les principales conditions à observer dans la construction des électros.

Le noyau doit être en fer aussi doux que possible, afin de pos-

séder une capacité magnétique plus élevée. La fonte de fer ordinaire peut être aussi employée ; elle prend plus facilement que le fer doux son état normal de magnétisme et le conserve plus constant sous l'influence de légères variations dans la vitesse de l'induit. Par contre, comme elle est moins magnétique, elle a besoin d'être plus volumineuse et doit être recouverte d'une plus grande quantité de fil de cuivre. Certaines considérations de rendement, de poids et de prix de revient peuvent faire donner la préférence au fer doux ou à la fonte.

Le noyau doit avoir une masse suffisante pour que sa saturation ne soit pas trop vite atteinte.

Pour des raisons analogues, les pôles des électros doivent avoir de grandes dimensions. Il faut aussi les construire de façon à éviter que le mouvement de rotation ne détermine en eux des courants particulaires induits, dits *courants de Foucault*. Comme l'a montré ce physicien, ces courants prennent naissance dans l'intérieur des masses métalliques, toutes les fois qu'elles sont mises en mouvement dans un champ magnétique ; ils se ferment sur eux-mêmes, et suivant les lois de l'induction, ils ont une direction perpendiculaire à celle du mouvement. Or, dans une dynamo, il y a mouvement de la masse métallique qui constitue le noyau des électros, par rapport au champ magnétique formé par le noyau des bobines induites. Il se développera donc dans cette masse des courants particulaires induits, et leur production consommera une certaine partie du travail fourni à la machine ; on a donc intérêt à diminuer autant que possible la perte qu'ils occasionnent. Dans ce but, on peut former les pôles des électros de lames métalliques superposées de façon que leur masse soit coupée par des plans perpendiculaires à la direction des courants de Foucault, et que ces discontinuités s'opposent au développement de ceux-ci.

Les pôles des électro-aimants s'épanouissent dans le voisinage des bobines induites, de façon à embrasser une grande portion de leur circonférence ; on obtient ainsi un champ magnétique plus uniforme.

Quant à la résistance qu'il faut donner aux bobines des électros par rapport à celles des bobines induites et du circuit extérieur, elle a été établie par sir William Thomson. Nous ne pouvons ex-

poser ici la série de ses calculs, mais voici les résultats auxquels il est arrivé :

Dans une dynamo auto-excitatrice en série, il faut prendre la résistance des bobines des électros un peu inférieure à celle des bobines induites : le rapport de 2 à 3 est une bonne proportion. Toutes les deux doivent d'ailleurs être faibles en comparaison de la résistance du circuit extérieur.

Pour les dynamos à excitation dérivée, la règle n'est plus la même ; la résistance des bobines des électros doit être beaucoup plus grande (au moins 324 fois) que celle des bobines induites ; en outre, le produit de ces deux résistances doit être égal au carré de la résistance extérieure.

171. Construction des bobines induites. — De même que les courants de Foucault prennent naissance dans les noyaux des électros, des courants analogues se développent dans les noyaux des bobines induites ou de l'*armature*[1]. On les diminue en formant ces noyaux de feuilles ou de fils métalliques isolés parallèles à la direction du mouvement. Le fer doit être choisi aussi doux que possible.

La force électromotrice induite étant proportionnelle à la longueur du fil induit, on a intérêt à augmenter le nombre de spires que fait ce fil sur ce noyau. Mais, pour que l'armature n'occupe pas trop de place et puisse être mise entre les pôles des électros, on est conduit à diminuer le diamètre du fil, ce qui augmente la résistance de la machine. Afin que cette résistance ne devienne pas trop grande, ce qui nuirait au bon fonctionnement de la dynamo, on choisit pour le fil du cuivre aussi pur que possible et par suite très conducteur.

Pour la même raison, on doit éviter qu'il existe des portions de fil qui ne soient pas soumises à l'action directe du champ magnétique : leur seul rôle est en effet de constituer des résistances inutiles ; c'est ce qui se passe dans les parties intérieures de l'anneau Gramme.

[1] Le nom d'armature a été généralement adopté pour désigner l'ensemble de l'appareil induit. Nous conserverons cette dénomination dans le cours de cet ouvrage.

Enfin, comme la résistance de l'armature transforme toujours une certaine quantité d'énergie électrique en chaleur, l'induit s'échauffe, et il faut laisser de l'espace autour de ces bobines, afin qu'elles puissent se refroidir par la ventilation.

172. — Dans la pratique, les armatures des dynamos sont susceptibles d'être réparties dans quatre catégories différentes :

1° Les armatures en anneau, où les bobines sont groupées sur un anneau mobile autour de son axe de symétrie (dynamos Gramme, Brush, Schückert, etc.) ;

2° Les armatures en cylindre, où les bobines sont enroulées longitudinalement sur la surface d'un cylindre mobile autour de son axe (dynamos Siemens-Alteneck, Edison, etc.) ;

3° Les armatures à pôles, où les bobines sont enroulées sur des pôles séparés les uns des autres et disposés sur une circonférence (dynamos alternatives Siemens, Zipernowsky, etc).

4° Les armatures à disque, dans lesquelles les boucles élémentaires qui constituent l'anneau Gramme sont aplaties sur un disque perpendiculaire à l'axe de rotation, et réduites à une portion de fil rectiligne (dynamo Desroziers).

Nous retrouverons ces différentes espèces d'armatures dans la description des dynamos.

173. Calage des balais. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que les deux pôles, qui se forment dans l'anneau en fer doux de l'armature, étaient placés en N′, S′, exactement sur la ligne NS des pôles inducteurs (fig. 100). Dans la pratique, il n'en est pas ainsi, et la ligne de ces deux pôles se trouve reportée en N″S″, d'un certain angle *en avant* de sa position théorique dans le sens de rotation de l'anneau. Il en résulte que la ligne neutre, c'est-à-dire celle sur laquelle on doit caler les balais, est reportée aussi du même angle et dans le même sens en CD.

M. Marcel Deprez a donné l'explication suivante de ce phénomène : l'anneau de l'armature ne se trouve pas seulement soumis à l'action des pôles inducteurs N, S, qui tendent à développer des pôles en N′, S′. Il subit en outre la réaction du courant qui circule dans le fil induit. Cette réaction aurait pour effet, si elle était

seule, de transformer les parties supérieure et inférieure de l'anneau en deux aimants, dont les pôles coïncideraient et seraient en A pour le pôle sud et en B pour le pôle nord, sur le diamètre perpendiculaire à N′ S′. Ces deux influences contraires donnent lieu à une aimantation résultante, pour laquelle la ligne des pôles se trouve occuper en N″ S″ une position intermédiaire entre les deux positions extrêmes N′ S′ et AB. La ligne neutre sur laquelle on doit caler les balais change aussi de position et vient en CD perpendiculairement à N″ S″.

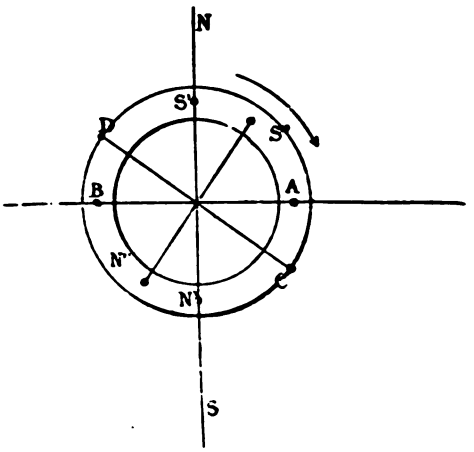


Fig. 100.

Il résulte de cette observation qu'une position donnée des balais correspond à un sens déterminé dans la rotation de la machine et que, pour obtenir d'une dynamo le courant qu'elle peut produire, le sens du mouvement de rotation n'est pas indifférent.

L'hypothèse de M. Deprez conduit encore à une autre conséquence : plus le courant induit est énergique, plus son action sur le noyau de l'armature est forte, et plus la ligne des pôles et la ligne neutre se trouvent déplacées. La position des balais dépend donc de la valeur du courant produit et doit varier avec elle, ce qui conduit à adopter dans les machines des balais à calage variable.

Dans la pratique cependant, cette question n'a pas une importance extrême, et l'on peut au besoin se dispenser de cette précaution ; car on a toujours intérêt à faire marcher la machine à sa vitesse normale, pour laquelle le calage est fait par les constructeurs.

En résumé, il faut toujours avoir bien soin de faire tourner l'armature dans un sens tel que la position des balais soit *en avance* par rapport au diamètre horizontal.

174. — Les balais doivent donc être placés aux deux points du collecteur qui sont situés dans la zone neutre. Ces points sont ceux qui ont entre eux la plus grande différence de potentiel ; en effet, comme nous l'avons dit plus haut, dans l'anneau Gramme les deux demi-circonférences supérieure et inférieure sont parcourues chacune par des courants de sens contraire qui viennent se réunir aux balais ; ces mêmes courants passent dans les différentes lames du collecteur. Mais chaque bobine de l'armature ajoute sa propre force électromotrice au courant qui la traverse, et si l'on mesure la différence de potentiel entre le balai négatif et les lames successives du collecteur, on trouve que cette différence augmente d'une façon régulière et devient maxima sur le balai positif.

Fig. 101.

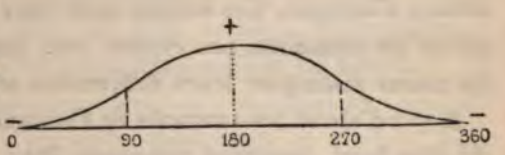


Fig. 102.

Le procédé suivant, indiqué par le professeur Silvanus Thompson, permet de déterminer expérimentalement les deux points du collecteur où le potentiel atteint son maximum et son minimum, c'est-à-dire la zone neutre de la machine. Il suffit de joindre une lame du collecteur à une des bornes d'un voltmètre, et de relier successivement l'autre borne à toutes les lames.

Si l'on prend dans cette expérience le balai négatif comme point de départ, et qu'on porte les indications du voltmètre sur un cercle correspondant à celui du collecteur, on obtient une courbe (fig. 101) qui indique les variations du potentiel sur ce collecteur. Le même résultat peut être représenté par la figure 102 plus facile à analyser. Cette figure, obtenue par M. Thompson sur un anneau Gramme, montre que la différence de potentiel entre deux lames consécutives du collecteur n'est pas la même pour toutes les lames, sans quoi la courbe se composerait de deux lignes

droites. Cette différence est au contraire très faible dans le voisinage des deux balais et atteint son maximum à environ 90 degrés des balais, à l'endroit où la courbure change, c'est-à-dire dans la partie du collecteur qui communique avec les bobines placées en face des pôles de l'anneau.

Le procédé que nous venons d'indiquer n'est possible que pour des expériences de laboratoire. Dans la pratique, lorsque le calage des balais est dérangé, on le rétablit en choisissant le point où l'on remarque le moins d'étincelles. Nous en verrons la raison dans le paragraphe suivant.

175. Pertes d'énergie dans les machines. — Toutes les machines électriques subissent dans leur fonctionnement des actions nuisibles, inhérentes à leur nature même, qui entraînent des déperditions d'énergie. Ces actions sont dues à plusieurs causes, et bien qu'on ne connaisse pas encore leur importance relative, on peut du moins distinguer leurs différentes origines.

Il y a d'abord les courants de Foucault qui, comme nous l'avons dit plus haut, prennent naissance dans les noyaux des électros et de l'armature ; nous avons indiqué les procédés à employer pour diminuer leur influence.

Une autre déperdition provient du mode de construction de l'armature. Les extrémités de chaque bobine induite aboutissent à deux lames successives du collecteur et les balais touchent plusieurs lames à la fois, afin qu'il n'y ait pas d'interruption du courant. Il arrive donc que les deux extrémités de la bobine située dans la zone neutre sont réunies par le balai métallique, et que cette bobine se trouve fermée sur elle-même en court circuit. Au moment où cette fermeture est sur le point de se produire, la bobine est parcourue par le courant de la machine ; ses deux bouts possèdent donc une différence de potentiel qui, lorsqu'elle est en court circuit, détermine un courant de décharge et, par suite, une perte d'énergie. C'est là la cause des étincelles que l'on observe aux balais ; car lorsqu'une des deux lames du collecteur auxquelles aboutit la bobine en court circuit quitte le balai, il y a rupture du circuit et par suite production d'une étincelle. Il résulte de là qu'on a intérêt à ne pas augmenter le nombre des balais.

En général, cette action n'est pas trop considérable, parce que la différence de potentiel entre deux lames successives du collecteur est assez faible aux environs de la zone neutre, comme nous l'avons vu plus haut. C'est pour ce motif que les étincelles y sont moins fortes que partout ailleurs, et qu'on peut se guider sur elles pour le calage des balais. La perte est d'ailleurs moins sensible dans les grandes machines que dans les petites, les premières permettant un fractionnement plus grand de l'anneau.

Enfin, une certaine quantité d'énergie se trouve encore absorbée par l'aimantation et la désaimantation successives des masses de fer, qui produisent dans ces masses une élévation appréciable de température.

176. Rendement industriel. — Il résulte de ce que nous venons de dire qu'une machine dynamo ne peut restituer intégralement en énergie électrique l'énergie mécanique qui lui est fournie.

Les frottements, les résistances passives consomment aussi de la force. Enfin, l'énergie électrique transformée en chaleur dans l'intérieur de la machine par suite de la résistance du fil de l'induit et de l'inducteur, constitue elle-même une perte, puisqu'elle n'est pas utilisable dans le circuit extérieur. De là la nécessité d'établir le rendement d'une dynamo.

On appelle *rendement industriel* d'une dynamo le rapport du travail électrique utile disponible aux bornes au travail mécanique total dépensé sur l'arbre.

Les bonnes machines électriques ont un rendement industriel de 80 à 90 p. 100, lorsque le noyau des inducteurs est en fer, de 80 à 85 p. 100 lorsqu'il est en fonte. Certains constructeurs arrivent même dans le premier cas à un rendement de 95 p. 100.

177. Mesure du rendement industriel. — 1° Le travail total dépensé se mesure au moyen d'un dynamomètre de transmission qu'on interpose entre le moteur et la dynamo. Le travail utile s'obtient en kilogrammètres, en prenant l'intensité du courant extérieur I avec un ampèremètre, la différence de potentiel aux bornes E_d avec un voltmètre, faisant le produit de ces

deux quantités et le divisant par l'accélération de la pesanteur, $\frac{E_d\ I}{9,81}$.

2° Si l'on désire n'effectuer que des mesures mécaniques, on prend une seconde dynamo identique à celle dont on cherche le rendement, et on relie les bornes des deux machines par deux fils conducteurs assez courts. L'une d'elles, étant actionnée par un moteur, engendre un courant qui traverse l'autre; d'après le principe de la réversibilité des dynamos, cette dernière se met à tourner et à produire un certain travail mécanique.

On mesure alors la puissance absorbée par la première machine au moyen d'un dynamomètre, et la puissance disponible sur l'arbre de la seconde avec un frein de Prony. Le rapport de ces deux quantités donne le produit des rendements industriels des deux machines, ou encore, comme celles-ci sont identiques, le carré du rendement individuel de chaque machine.

Par exemple, si le dynamomètre indique une dépense de 200 kilogrammètres par seconde, et le frein de Prony une puissance disponible de 128 kilogrammètres, le produit des rendements est $\frac{128}{200}$ ou 0,64, et chaque rendement $\sqrt{0,64}$ ou 0,80.

L'opération se vérifie par une seconde mesure, en changeant le rôle des dynamos, c'est-à-dire en faisant produire le courant par la seconde et en l'envoyant dans la première.

3° La méthode suivante a été proposée par le Dr Hopkinson dans le but de réduire au minimum les erreurs dues à l'emploi d'un dynamomètre. Elle consiste à prendre deux dynamos identiques, à accoupler directement leurs arbres par un manchon flexible portant en même temps la poulie motrice, et enfin à réunir leurs bornes par deux conducteurs de résistance négligeable.

Mais, si l'on mettait dans ces conditions l'ensemble des deux machines en mouvement, elles développeraient chacune une force électromotrice égale et opposée, et aucun courant ne prendrait naissance. On évite cela en introduisant une résistance dans le circuit d'excitation d'une des machines et diminuant ainsi son champ magnétique. (Il résulte de là que la méthode n'est pas applicable aux dynamos excitées en série.) Grâce à cette modification, lorsqu'on actionne l'arbre commun, la machine dont le

champ magnétique n'a pas été modifié produit un courant qui traverse l'autre dynamo. Celle-ci, en vertu de sa réversibilité, agit comme réceptrice et contribue au mouvement de rotation de l'arbre et par suite de la génératrice. Le mouvement s'entretient donc en grande partie de lui-même, et la courroie commandant la poulie n'a qu'à transmettre la différence entre la puissance dépensée par la génératrice et la puissance utile fournie par la réceptrice, différence qui comprend les pertes d'énergie subies dans les deux dynamos.

Cette combinaison présente plusieurs avantages : la puissance transmise par la courroie, étant relativement faible, peut être mesurée avec plus de facilité et d'exactitude ; une erreur même importante dans cette mesure dynamométrique n'influence que fort peu le résultat final ; enfin un moteur de peu de puissance suffit pour déterminer le rendement de fortes machines.

Les appareils une fois mis en marche, on obtient le rendement industriel en mesurant : 1° la puissance P transmise par la courroie sur l'arbre des deux machines, au moyen d'un petit dynamomètre ; 2° la puissance électrique aux bornes de la génératrice, c'est-à-dire $\frac{E_d\ I}{9,81}$; 3° la puissance électrique aux bornes de la réceptrice ou $\frac{E'_d\ I}{9,81}$.

Si l'on désigne par X et Y les pertes subies dans chaque dynamo, la puissance mécanique dépensée par l'ensemble est $P + \frac{E'_d\ I}{9,81} - Y$, et se trouve employée à produire la puissance électrique de la génératrice $\frac{E_d\ I}{9,81} + X$, de telle sorte qu'on peut écrire

$$P + \frac{E'_d\,I}{9,81} - Y = \frac{E_d\ I}{9,81} + X.$$

Mais, comme les dynamos sont identiques, les pertes X et Y peuvent être considérées comme égales, et

$$X = \frac{1}{2}\left(P - \frac{I}{9,81}\,(E_d - E'_d)\right).$$

On a alors la valeur du rendement industriel d'une des machines employée comme génératrice en calculant l'expression

$$\frac{E_d\ I}{E_d\ I + X}.$$

178. Rendement électrique. — Le *rendement électrique* d'une dynamo, que l'on a quelquefois besoin de connaître, est le rapport de la puissance électrique disponible aux bornes à la puissance électrique totale développée dans la machine.

La puissance électrique disponible aux bornes a, comme nous venons de le voir, pour mesure le produit de la différence de potentiel aux bornes par l'intensité divisé par l'accélération de la pesanteur, $\frac{E_d I}{9,81}$.

Quant à la puissance électrique totale développée dans la machine, elle s'exprime en kilogrammètres en faisant le produit de la force électromotrice par l'intensité, et le divisant par l'accélération de la pesanteur. Il faut remarquer que, contrairement à ce qui se passe pour les piles, la force électromotrice E d'une dynamo ne peut pas se mesurer. On l'obtient par le calcul en ajoutant à la différence de potentiel aux bornes E_d le produit IR de l'intensité I par la résistance intérieure R de la machine, produit qui représente la partie de la force électromotrice absorbée par les résistances de l'induit et de l'inducteur : c'est-à-dire que

$$E = E_d + IR.$$

On a donc pour la puissance électrique totale développée dans la machine

$$\frac{(E_d + IR)\,I}{9,81} \text{ kilogrammètres,}$$

de telle sorte que le rendement électrique a pour expression

$$\frac{E_d\,I}{(E_d + IR)\,I} \text{ ou } \frac{E_d}{E_d + IR}.$$

179. — Remarquons en outre que le produit IR prend différentes formes suivant le mode d'excitation de la machine.

1° Dans le cas d'une machine magnéto ou d'une dynamo à excitation indépendante, la résistance R se réduit à celle de l'armature R_a :

$$IR = IR_a;$$

2° Pour une machine excitée en série, en appelant R_a et R_e les résistances respectives de l'armature et de l'électro :

$$IR = I\,(R_a + R_e);$$

3° Avec une dynamo excitée en dérivation, en appelant I_a et I_e les intensités respectives dans l'armature et l'électro :

$$IR = I_a R_a + I_e R_e;$$

4° Enfin, dans le cas d'une dynamo à double enroulement, en appelant R'_e et R''_e les résistances respectives des bobines de l'électro placées en série et en dérivation :

$$IR = I_a (R_a + R'_e) + I_e R''_e$$

Ce que nous venons de dire des rendements industriel et électrique ne s'applique qu'au cas où la machine est employée comme génératrice ; les définitions ne sont plus les mêmes lorsqu'elle sert de réceptrice, ainsi que nous le verrons dans le chapitre de la transmission.

180. Etude des différents modes d'excitation. — Nous allons maintenant revenir sur les différents modes d'excitation des dynamos dont nous avons simplement signalé l'existence.

Excitation indépendante. — Ce genre d'excitation (fig. 93) présente certains avantages. Il donne une force électromotrice indépendante de la résistance du circuit extérieur, et permet de changer à volonté l'intensité du champ magnétique, en modifiant soit la force électromotrice, soit la résistance du circuit excitateur. Ce système est nécessaire avec les dynamos à courants alternatifs, à moins qu'on ne dispose d'un commutateur avec lequel on puisse redresser les courants avant de les envoyer dans les inducteurs.

Il a l'inconvénient d'exiger une machine excitatrice.

Excitation en série. — La dynamo excitée en série (fig. 94) est d'une construction plus simple que les autres machines auto-excitatrices. Les inducteurs reçoivent tout le courant qui parcourt l'induit et le circuit extérieur ; ils doivent donc avoir eux-mêmes très peu de résistance et être par suite formés de gros fil.

Cette dynamo possède le défaut d'être très sensible aux variations de résistance du circuit extérieur. Supposons, en effet, qu'on augmente cette résistance ; d'après la loi de Ohm, on diminue par cela même l'intensité du courant. Cette diminution se fait aussitôt

sentir dans les bobines des électros ; le champ magnétique devient moins puissant et la force électromotrice du courant induit décroît, précisément au moment où elle devrait augmenter. C'est là un inconvénient assez grave.

De plus, pour que la machine puisse entrer en action, c'est-à-dire pour que le courant prenne naissance, il faut que la vitesse soit suffisante et que la résistance du circuit ne soit pas trop considérable. Or, dans l'éclairage par incandescence, les lampes sont beaucoup moins conductrices à froid qu'à chaud ; une résistance calculée pour la marche normale peut donc être au début trop forte pour la machine. On se trouve ainsi forcé de fermer la dynamo en court circuit pendant les premiers tours, et l'on produit une absorption subite de force préjudiciable aux organes de la machine.

Enfin, lorsqu'une dynamo fonctionne sur un appareil qui produit une force contre-électromotrice, celle-ci peut devenir à un moment donné supérieure à la force de la dynamo. Le courant change de sens et renverse la polarité du champ magnétique, de telle sorte que, même après la disparition de la cause qui a produit le changement, le courant continue à aller dans le sens contraire au sens primitif, ce qui peut constituer un désavantage sérieux, par exemple, lorsque la machine est employée à l'électrolyse d'un bain de galvanoplastie ou au chargement d'accumulateurs.

L'excitation en série pourrait être avantageusement appliquée avec des lampes disposées en quantité, l'addition d'une lampe diminuant la résistance du circuit extérieur et l'intensité du courant se trouvant par suite augmentée. Mais, pour les raisons que nous venons d'indiquer, cette disposition est peu employée dans la pratique.

Excitation en dérivation. — Avec l'excitation en dérivation (fig. 95) quand on accroît la résistance du circuit extérieur, le courant qui passe par le shunt des électros devient plus intense et augmente la force électromotrice. On peut donc dire que la machine fournit en quelque sorte une énergie proportionnée au travail demandé. Lorsqu'on l'applique à l'éclairage, on a, par suite, intérêt à placer les lampes en série ; mais cette disposition offre au point de vue du

fonctionnement des lampes certains désavantages que nous verrons plus loin.

La machine à excitation dérivée est toujours excitée, quel que soit le circuit extérieur et alors même qu'il n'existerait pas ; c'est l'inverse des machines excitées en série avec lesquelles le circuit extérieur doit être fermé.

Cette méthode est surtout utile toutes les fois qu'il peut se produire une force contre-électromotrice dans le circuit extérieur, car elle empêche les changements de sens du courant dont nous avons parlé plus haut.

Contrairement à ce que nous avons dit pour le montage en série, les bobines inductrices n'ont à recevoir dans le montage en dérivation, qu'une partie du courant de l'induit. Aussi, pour ne pas trop réduire le courant extérieur, faut-il leur donner une résistance élevée et prendre par suite un fil fin ; il résulte de là que le nombre de spires doit être assez grand pour produire le magnétisme nécessaire.

Excitation en double circuit ou compound. — Avec l'excitation en série, la force électromotrice, ou encore la différence de potentiel aux bornes de la dynamo qui varie dans le même sens, diminue quand on augmente la résistance extérieure ; elle augmente au contraire avec l'excitation en dérivation. En d'autres termes, les variations de la différence de potentiel sont de sens opposé pour les deux modes d'excitation ; on comprend donc qu'en combinant les deux systèmes, on puisse annuler ces variations, ou tout au moins les réduire dans une grande mesure.

Cette disposition est réalisée par l'excitation en double circuit ou excitation compound (fig. 96), indiquée en premier lieu par M. Brush, dans laquelle les électros sont excités, partie par le courant principal, partie par une dérivation prise sur les bornes de la machine. Le premier circuit est en gros fil, le second en fil fin ; l'ordre de leur enroulement et leurs longueurs respectives varient avec les types de machines, mais ils sont établis de façon que les variations de la différence de potentiel aux bornes soient réduites à leur minimum.

L'enroulement compound n'est pas sans inconvénients ; il force

à donner rigoureusement à l'induit la vitesse pour laquelle les inducteurs ont été calculés, et à conserver cette vitesse sans aucun changement, si l'on veut que la différence de potentiel aux bornes de la dynamo reste constante ; son emploi occasionne une dépense un peu plus grande d'énergie pour l'excitation ; son prix d'établissement est plus élevé que celui des autres enroulements ; avec une vitesse irrégulière ou différente de celle déterminée, il ne remplit plus son but et donne lieu à des étincelles qui usent rapidement les collecteurs. Malgré ces inconvénients, comme, dans les applications d'éclairage par incandescence, il préserve les lampes d'une destruction prématurée, comme il permet d'éteindre un nombre quelconque de foyers sans que les autres en soient influencés et sans que l'on ait à s'occuper de la marche de la dynamo, son emploi a pris une grande extension.

181. Caractéristiques des machines électriques. — Ainsi que l'ont démontré successivement le Dr Hopkinson, le Dr Frolich et M. Marcel Deprez, il existe une manière très simple d'étudier graphiquement le fonctionnement d'une dynamo. Pour cela, la machine marchant à une vitesse constante, on fait varier la résistance du circuit extérieur et on relève les valeurs correspondantes de la force électromotrice et de l'intensité. La force électromotrice étant portée en ordonnées et l'intensité en abscisses, on construit une courbe qui indique l'allure de la machine et qui porte le nom de *caractéristique*. Pour une vitesse donnée, la forme de cette courbe dépend de la construction de la machine; elle en représente le fonctionnement et caractérise l'appareil, de même que les diagrammes obtenus à l'aide de l'indicateur de Watt sur une machine à vapeur indiquent les qualités de cette machine.

Lorsque l'échelle à laquelle la caractéristique a été construite est connue, cette courbe permet en effet de déterminer la quantité d'énergie électrique produite par la dynamo, et montre les conditions dans lesquelles on doit la faire marcher pour en tirer le meilleur parti. Elle est encore utile lorsque l'échelle n'est pas connue ; elle fournit alors des renseignements sur le degré de

uration des électro-aimants, sur leur puissance par rapport à mature, etc.

82. — Pour montrer le parti que l'on peut tirer de cette mé-de graphique, voici quelques exemples que nous empruntons à

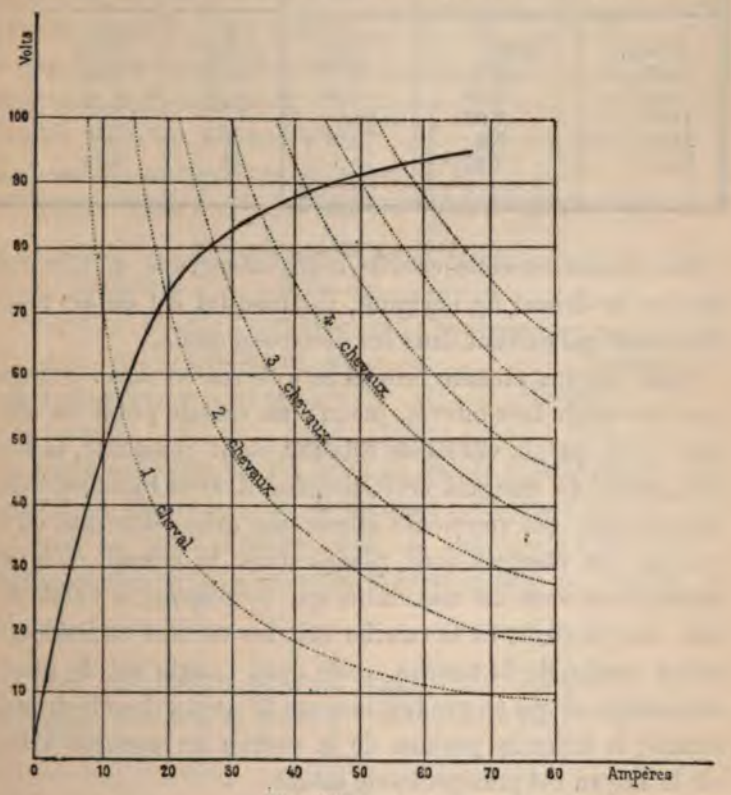


Fig. 103.

vrage de M. Silvanus Thompson sur les machines dynamo-triques.

a figure 103 est la caractéristique d'une dynamo Siemens excitée série et marchant à 720 tours par minute. Les abscisses repré-ent des ampères. Les ordonnées sont des volts ; ce sont les rentes valeurs de la force électromotrice totale de la machine. construire cette courbe, on a mesuré directement les am-s, et l'on a calculé les volts en multipliant les ampères par la

résistance totale du circuit. Le tableau suivant indique les résultats obtenus, qui sont représentés sur la figure :

INTENSITÉS EN AMPÈRES	RÉSISTANCES EN OHMS	FORCES électromotrices EN VOLTS	INTENSITÉS EN AMPÈRES	RÉSISTANCES EN OHMS	FORCES électromotrices EN VOLTS
0,0027	1025	2,72	26,8	3,025	81,1
0,48	8,3	3,95	32,2	2.62	84,4
1,45	5,33	7,73	34,5	2,43	83,8
16.8	4,07	68,4	37,1	2,28	84,6
18,2	3,8	70,6	42	2,08	87,4
24,8	3,205	79,5			

En examinant cette courbe, nous observons qu'elle commence un peu au-dessus de l'origine. Ce résultat est dû au magnétisme rémanent qui existait dans les électro-aimants.

Nous voyons ensuite la courbe s'élever en ligne presque droite sous un angle très ouvert, jusqu'à un certain point où elle s'infléchit. C'est que, la vitesse de rotation étant constante, la force électromotrice du courant croît seulement avec l'intensité du champ magnétique, qui augmente elle-même avec l'intensité du courant, puisque les électros sont placés dans le circuit. L'intensité du champ tend vers un maximum qui correspond à l'état de saturation des électros, et la courbe suit les mêmes variations. La première partie de la courbe, celle dont l'angle est le plus ouvert, représente ce qui se produit lorsque le noyau des électros n'est pas saturé ; la seconde portion de la courbe se rapporte à la période où le noyau est pratiquement saturé.

183. — Ces courbes nous montrent à première vue les relations qui existent entre la force électromotrice et l'intensité. On peut y faire figurer aussi la puissance d'une dynamo en chevaux.

Rappelons que 1 watt ou volt-ampère égale

$$\frac{1}{75 \times 9,81} \text{ ou } \frac{1}{736} \text{ de cheval-vapeur.}$$

Si donc on prend sur la caractéristique un point quelconque et qu'on divise par 736 le produit de ses coordonnées, on aura la

puissance correspondant à ce point de la courbe. Au moyen de cette remarque, nous pouvons tracer sur la figure une série de courbes d'égale puissance.

La ligne de puissance correspondant à 1 cheval passera, par exemple, par tous les points pour lesquels le produit des volts par les ampères est égal à 736, c'est-à-dire par les points ayant 73,6 volts et 10 ampères, 36,8 volts et 20 ampères, 14,72 volts et 50 ampères, etc... De même, la ligne de puissance correspondant à 2 chevaux passera par les points pour lesquels ce produit est égal à 736 × 2 ou à 1472, et ainsi de suite. En réunissant par des lignes continues les points ainsi obtenus, on a les courbes d'égale puissance.

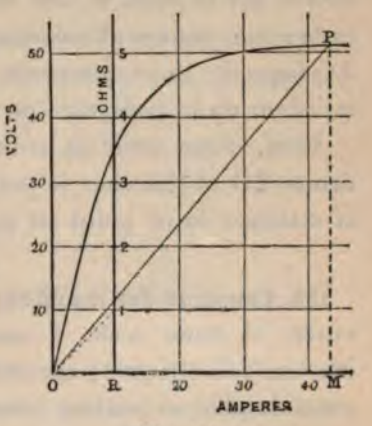


Fig. 104.

Ces courbes sont tracées en pointillé sur la figure 103 et elles représentent la puissance de la dynamo correspondant à 1, 2, 3... chevaux. Le point d'intersection de chacune d'elles avec la caractéristique donne la puissance correspondant au courant en ce point.

184. — Les résistances peuvent aussi être indiquées sur la caractéristique. Prenons le point P, nous avons (fig. 104) :

$$R = \frac{PM}{OM}$$

Or

$$\frac{PM}{OM} = \text{Tg POM}$$

Donc

$$R = \text{Tg POM}.$$

Ainsi, si l'on joint un point de la courbe à l'origine, la tangente de l'angle que fait cette droite avec l'axe des x donne la résistance en ce point.

Traçons, à partir de O, une ligne droite à 45°, c'est-à-dire passant par le point qui a une intensité de 10 ampères pour une

force électromotrice de 10 volts, la tangente de cet angle est égale à 1, et l'ordonnée de ce point pourra représenter l'unité de résistance, soit 1 ohm.

Si alors nous portons, sur la parallèle à l'axe des ordonnées menée par le point R, une série de points à des distances égales à cette unité, nous construirons une échelle des résistances, au moyen de laquelle nous pourrons obtenir immédiatement en ohms la valeur de la résistance du circuit.

Ainsi, pour avoir la résistance en P, il faut tracer la ligne droite PO et chercher le point où elle coupe l'échelle des ohms; la distance de ce point au point R donne la résistance cherchée.

185. Couplage des machines électriques. — Pour terminer cette étude, il nous reste à examiner la manière de coupler les machines électriques ; car une machine étant assimilable à un élément de pile, on peut en associer un certain nombre, soit en série, soit en quantité. Nous devons ici distinguer deux cas principaux, suivant que les dynamos sont à courant continu ou à courants alternatifs.

Dynamos à courant continu. Couplage en série. — Ce couplage en série n'offre pas de difficulté ; il diffère cependant suivant le

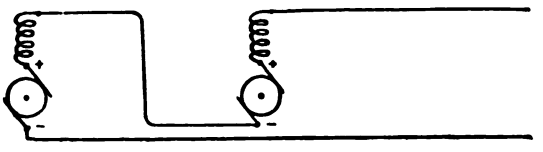


Fig. 105.

mode d'excitation de la machine ; nous allons indiquer les diverses solutions données par M. H. Fontaine.

1° Si les inducteurs sont montés en série, il suffit de réunir la borne négative de l'une à la borne positive de l'autre, et de relier le circuit extérieur avec la borne positive de la première et la borne négative de la seconde (fig. 105).

Il va sans dire qu'il faut préalablement choisir des machines fournissant très approximativement le même courant quand elles

fonctionnent séparément ; sinon on courrait le risque d'en brûler une en les couplant en tension.

On peut atteler ainsi un nombre quelconque de dynamos ; mais pratiquement on n'en réunit pas plus de trois ou quatre dans un même circuit.

2° Dans le cas où les inducteurs sont montés en dérivation, on procède de la même manière que précédemment, puis on relie les dérivations des inducteurs de manière que le fil dérivé parte de la

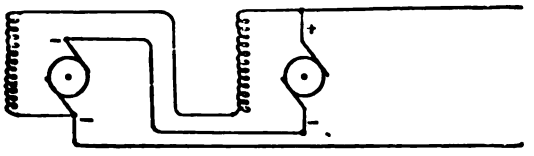


Fig. 106.

borne négative de la première machine, entoure les inducteurs des deux machines et aboutisse à la borne positive de la deuxième machine (fig. 106).

3° Lorsque les inducteurs sont à enroulement compound, on relie les gros fils comme dans le couplage des machines à inducteurs montés en série, et les fils fins comme dans le couplage des machines à inducteurs montés en dérivation (fig. 107).

Les différentes combinaisons que nous venons d'indiquer ont

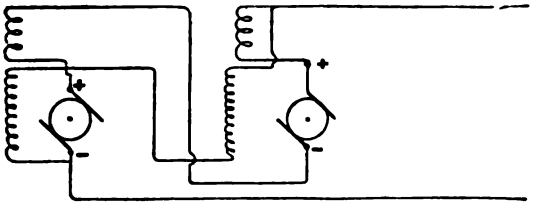


Fig. 107.

pour but de faire parcourir les inducteurs des deux machines par les mêmes courants et, par suite, de donner à celles-ci des champs magnétiques égaux.

Dynamos à courant continu. Couplage en quantité. — Le couplage de deux machines en quantité exige aussi des précautions.

En effet, la machine la moins puissante étant parcourue par un courant de sens contraire à celui qu'elle produit, le courant induc-

teur se trouve diminué dans les électros et le courant induit devient, par cela même, moins intense. La différence entre les deux machines s'accentue donc par leur association, et l'une d'elles absorbe une notable partie du courant de l'autre, sans rien produire elle-même.

Pour éviter cet inconvénient, on emploie les dispositions suivantes, d'après le mode d'excitation des inducteurs :

1° Si les inducteurs sont montés en série, on relie respective-

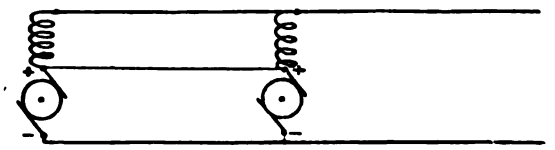


Fig. 108.

ment les bornes négatives et les bornes positives ; puis on ajoute un fil fin, *d'équilibre*, entre les bornes positives (fig. 108).

2° Si les inducteurs sont en dérivation, on relie les deux bornes

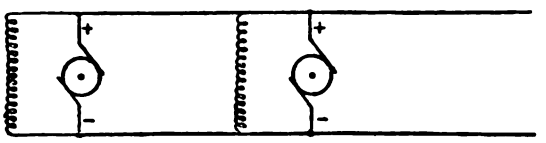


Fig. 109.

de même nom et les extrémités correspondantes des deux circuits inducteurs (fig. 109).

3° Enfin, avec l'enroulement compound, on procède comme

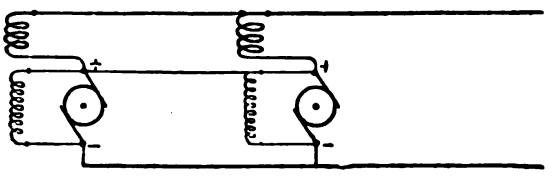


Fig. 110.

avec l'enroulement en série ; puis on rattache les extrémités des fils fins au fil d'équilibre d'une part et aux bornes négatives d'autre part (fig. 110).

Nous avons raisonné seulement sur le cas de deux dynamos ; la

manière d'opérer est absolument la même avec un plus grand nombre de machines.

Les divers modes de couplage indiqués ci-dessus sont très simples, et leur emploi ne présente aucun inconvénient. Cependant, lorsque les dynamos doivent être couplées en quantité pendant la marche, il est nécessaire de prendre quelques précautions préalables. Désignons, par exemple, par A et B les deux dynamos à réunir en quantité, et supposons que, la dynamo A alimentant seule le circuit extérieur, on veuille renforcer son courant par celui de la dynamo B. On commence par faire tourner la dynamo B à circuit ouvert, puis on ferme son circuit excitateur, et on la met enfin sur le circuit extérieur en fermant un interrupteur placé près d'une de ses bornes.

Pour arrêter une machine, on repasse par les mêmes phases, mais en sens inverse.

Dynamos à courants alternatifs. — Ainsi que l'a démontré M. J. Hopkinson, les machines à courants alternatifs réunies en série tendent à annihiler leurs courants, parce qu'elles adoptent des phases opposées d'alternativités. Ce mode de couplage ne peut donc pas être employé.

Il n'en est pas de même si l'on associe les machines en quantité ; il se produit au contraire dans ce cas une coïncidence spontanée des phases, et les courants s'ajoutent l'un à l'autre. Toutefois cette égalisation de phases a lieu le plus souvent d'une façon si brusque que la mise en marche des machines, au point de vue mécanique, en peut souffrir ; de plus, cette égalisation est habituellement accompagnée d'une variation brusque du courant extérieur qu'il est nécessaire d'éviter pour le bon fonctionnement des appareils en circuit.

Supposons que deux machines à courants alternatifs marchent indépendamment l'une de l'autre avec un nombre voisin d'alternativités ; il arrivera toujours certains instants où leurs phases coïncideront. (Le même fait s'observe dans la production des battements par deux sons ayant un nombre voisin de vibrations.) Si l'on peut effectuer le couplage des dynamos à l'un de ces instants, les inconvénients indiqués ci-dessus ne se présentent plus et les

deux machines se maintiennent d'elles-mêmes en concordance.

Il existe, pour reconnaître cette égalité des phases, plusieurs procédés assez simples parmi lesquels nous citerons la disposition suivante.

La machine M_1 (fig. 111) est supposée en communication avec les conducteurs extérieurs E, grâce aux clefs de circuit. Une dérivation prise sur les bornes de cette machine communique avec un premier circuit C_1 alimentant une bobine d'induction à noyau de fer. La dynamo M_2 destinée à fonctionner en quantité avec la précé-

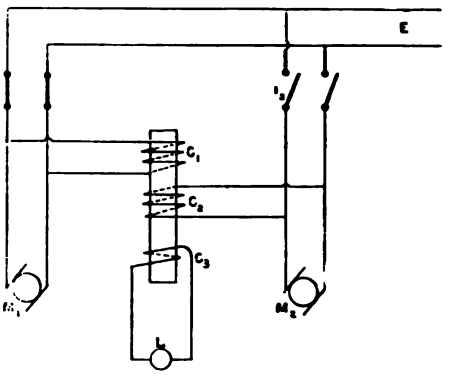


Fig. 111.

dente communique avec un second circuit C_2, identique à C_1 et enroulé sur le même noyau. Enfin ce dernier porte un troisième enroulement C_3 en série avec une lampe-témoin L.

La machine M_1, actionnée par un moteur indépendant, est mise en mouvement à la vitesse convenable. Aussi longtemps que les phases des deux machines sont en désaccord, la lampe subit des fluctuations périodiques comparables aux battements de deux diapasons non à l'unisson. Elle brûle d'un vif éclat au moment où, les phases des deux machines étant opposées, les actions des deux circuits C_1 et C_2 s'ajoutent, et elle s'éteint lorsque ces actions se neutralisent.

Il convient de saisir l'instant de l'opposition des forces électromotrices pour relier la seconde machine M_2 au réseau à l'aide des clefs de circuit I_2. Les machines continuent alors à fonctionner à l'allure voulue.

186. Comparaison entre les piles et les machines électriques. — On peut quelquefois se demander combien il faut d'éléments de piles pour remplacer une machine. On obtient ce renseignement en égalant les quantités d'énergie développées par les deux appareils. Soient E et R la force électromotrice et la résistance de la machine électrique, e et r la force électromotrice et la résistance intérieure d'un élément de la pile, N le nombre d'éléments.

La puissance fournie par la machine est RI^2 ou $\frac{E^2}{R}$.

De même celle d'un élément est $\frac{e^2}{r}$, et celle de N éléments en série $N\frac{e^2}{r}$. Il faudra donc que

$$N\frac{e^2}{r} = \frac{E^2}{R}.$$

Comme application de la formule précédente, nous pouvons citer l'exemple suivant indiqué par M. Deprez, à la suite d'expériences faites sur une machine Gramme, type A, dit type d'atelier. La pile comparée à cette machine est la pile Bunsen, modèle plat de Ruhmkorff :

Machine. —	Résistance intérieure en ohm. . . .	0,36
	Résistance du circuit extérieur. . . .	1,31
	Force électromotrice en volts à 1 225 tours par minute.	65,5
	Intensité en ampères.	39,2
Pile. —	Force électromotrice en volt.	1,8
	Résistance intérieure en ohm. . . .	0,06

En employant la formule trouvée plus haut, nous avons :

$$N \times \frac{\overline{1,8}^2}{0,06} = \frac{\overline{65,5}^2}{0,36}$$

d'où

$$N = 272.$$

Il faudra donc 272 éléments pour remplacer une machine donnant seulement 65,6 × 39,2 ou 2567,6 watts, c'est-à-dire un peu moins de 3,5 chevaux.

Cet exemple suffit pour faire comprendre la supériorité que les machines dynamos possèdent sur les piles dans toutes les applications de l'électricité où l'on a un travail un peu impor-

tant à effectuer. Cette supériorité s'accentue davantage lorsque le travail augmente, et dans les grandes installations la machine donne de très bons résultats quand la pile serait d'un emploi absolument impossible.

DESCRIPTIONS DE MACHINES. — MACHINES A COURANT CONTINU

DYNAMOS GRAMME

187. — Nous n'avons pas à revenir sur la description de l'anneau

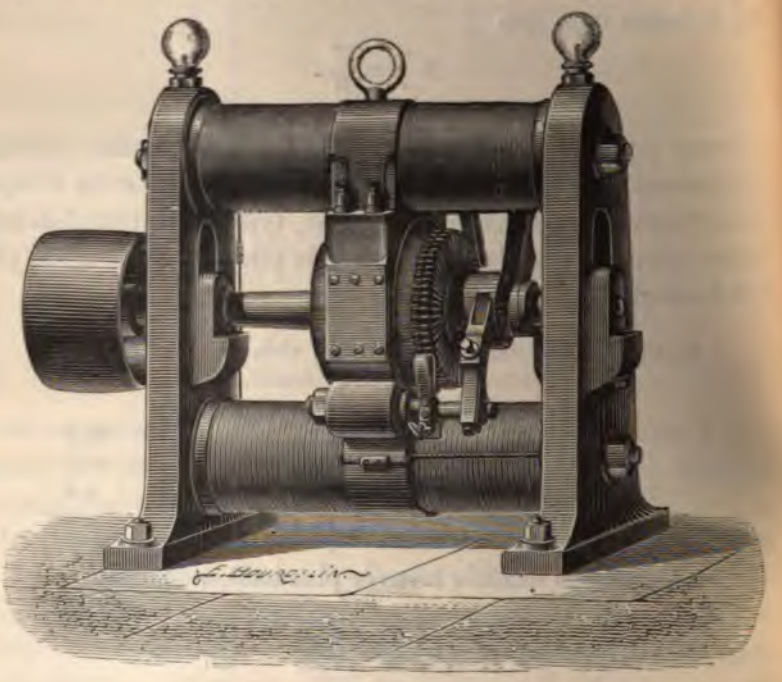


Fig. 112.

Gramme et de son collecteur, qui a été donnée précédemment avec tous les détails nécessaires.

Le seul désavange de cet anneau est, comme nous l'avons vu, que la portion intérieure du fil de ses bobines se trouve en dehors de l'action directe des électrodes et constitue une résistance inutile. Mais à côté de cet inconvénient, il présente de grandes qualités

qui l'ont rendu d'un emploi universel. Il est notamment d'une construction facile et robuste; de plus, par suite de son sectionnement en bobines, il permet, en cas d'accident, de remplacer aisément les parties avariées.

Voici les différents types de machines les plus employées dans les applications électriques :

Lumière. — La première machine Gramme à courant continu,

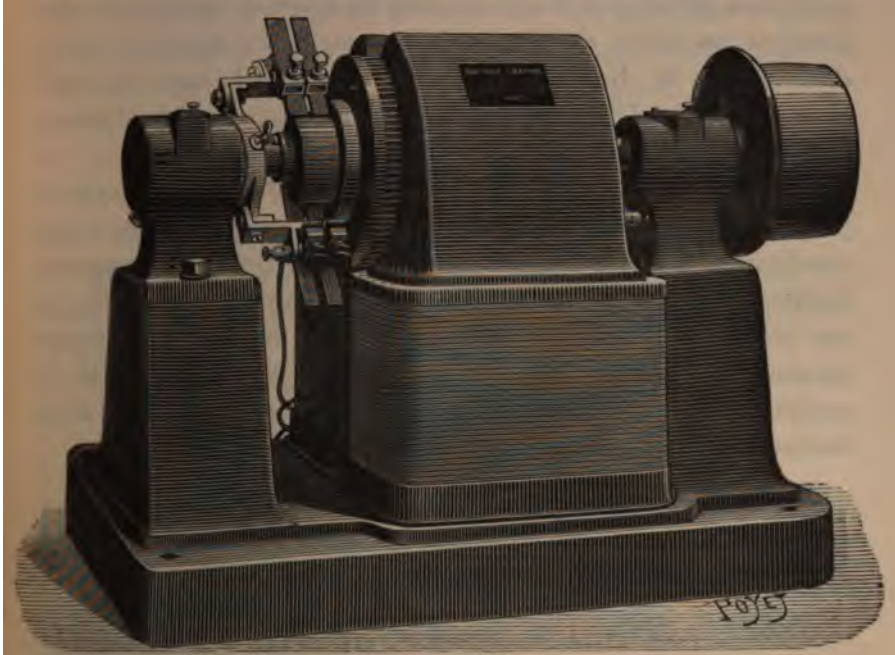


Fig. 113.

créée en vue de l'emploi industriel, est représentée figure 112. L'inducteur est constitué par le bâti même de l'appareil et comporte deux électro-aimants, montés l'un en face de l'autre, de façon que leurs pôles de mêmes noms se trouvent vis-à-vis.

Chacun de ces pôles s'épanouit en une coquille de fonte qui enveloppe l'armature sur un arc un peu moindre qu'une demi-circonférence.

C'est la machine dite *type normal* ou d'*atelier*. Elle absorbe une

force de 3 chevaux à une vitesse de 900 tours et donne un courant de 25 ampères sous 75 volts.

Nous devons ajouter que, depuis que le brevet de la machine type d'atelier est tombé dans le domaine public, un grand nombre de constructeurs se sont mis à la fabriquer; aussi trouve-t-on aujourd'hui dans le commerce plusieurs modèles n'en différant guère que par des détails peu importants.

Après de nombreux essais qui ont donné lieu à des machines de formes différentes, désignées sous les noms de *machine à cinq lumières*, *machine carrée*, *machine octogonale*, *machine cylindrique*, etc., M. Gramme est arrivé à adopter le type dit *supérieur* parce que l'induit est à la partie supérieure de la dynamo (fig. 113).

Cette machine comporte un électro-aimant en fonte terminé par de puissantes pièces polaires, en forme de mâchoires, qui enveloppent l'induit presque aux trois quarts; deux supports, également en fonte, qui reçoivent l'arbre central et sa poulie, et une plaque de fondation; le tout venu de fonte et ne formant qu'une seule et même pièce, ce qui rend l'appareil très robuste et particulièrement apte aux applications industrielles. L'anneau de la bobine est en fer doux.

Transport de la force. — Les machines employées pour le transport de la force sont identiques aux machines à lumière; les dimensions des fils induit et inducteur seules diffèrent.

Galvanoplastie. — Les machines destinées à la galvanoplastie ont encore la même disposition; mais elles offrent très peu de résistance intérieure, de façon à donner une grande intensité et une faible force électromotrice. Le conducteur enroulé sur les électros est formé d'une seule lame de cuivre, dont la largeur occupe toute la hauteur de l'électro et fait plusieurs tours sur le noyau.

L'anneau est aussi modifié; sur deux rondelles de cuivre, garnies de plusieurs entailles et clavetées sur l'arbre, se trouvent placées une série de longues barres de cuivre isolées les unes des autres et formant un cylindre complet dont les deux bouts servent de collecteurs. Le fil de fer, qui constitue le noyau, est enroulé

sur ce cylindre ; il est lui-même recouvert par une seconde série de barres de cuivre. Les barres intérieures et extérieures sont reliées entre elles par des traverses rayonnantes, de manière à former un conducteur sans fin, comme dans le cas des bobines étudiées précédemment.

Il existe plusieurs modèles de machines à galvanoplastie qui sont fabriquées en France par la Société Gramme.

Le type n° 1, principalement employé dans les usines d'argenture et de dorure, dépose à l'heure de 600 grammes à 1 kilogramme d'argent dans de bonnes conditions ; la force absorbée est au maximun de 1 cheval. Utilisé pour l'affinage du cuivre, il précipite 250 kilogrammes de ce métal par jour avec une force de 5 chevaux.

La machine n° 2 a de plus petites dimensions et se trouve par suite plus employée. Elle dépose par heure de 150 à 250 grammes d'argent, ou de 50 à 80 grammes de nickel ou de cuivre, en consommant une force motrice qui varie de 20 kilogrammètres à 1 cheval.

MACHINES DÉRIVÉES DE LA DYNAMO GRAMME

Nous allons examiner rapidement les différentes modifications apportées à la machine Gramme type d'atelier par les constructeurs étrangers.

188. Dynamo Schuckert. — La machine de M. Schuckert, de Nuremberg, est assez employée en Allemagne (fig. 114).

Les électros sont au nombre de deux et leurs pôles de mêmes noms se font vis-à-vis, comprenant l'armature dans leur intervalle. Quant à l'anneau, sur lequel l'enroulement du fil est identique à celui de la machine Gramme, il possède une forme aplatie, et est composé d'une série de couronnes de tôle mince juxtaposées et isolées les unes des autres. Le collecteur est le même que celui de Gramme. La seule particularité de cette dynamo consiste dans

la disposition du bâti qui, comme le montre la figure, permet d'enlever facilement l'anneau en cas de réparations.

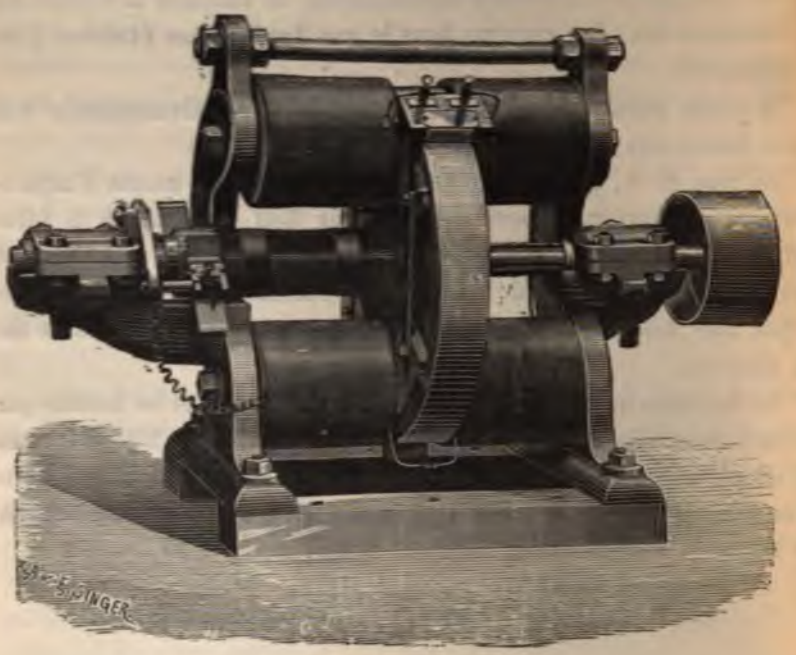


Fig. 114.

189. Dynamo Henrion. — La dynamo Henrion est du même type que la précédente ; elle n'en diffère que par la position des inducteurs qui font un angle de 45° avec l'horizon.

Les machines devant donner des courants supérieurs à 150 ampères sont à quatre pôles, mais elles n'ont que deux balais situés à 90° l'un de l'autre. Cette simplification a pu être réalisée en reliant les segments diamétralement opposés du collecteur qui ont toujours le même potentiel.

190. Dynamo Manchester. — La machine anglaise désignée sous le nom de *type Manchester* est construite par MM. Mather et Platt. L'inducteur est composé de deux noyaux cylindriques en fer, gros et courts, et de deux traverses horizontales en fonte d'une grande section, qui portent les développements polaires. L'enroulement

est en général compound. L'induit ne présente aucune particularité.

191. Dynamo Brown. — La machine Brown (fig. 115), construite par les ateliers d'Oerlikon, en Suisse, se rapproche beaucoup de la dynamo précédente ; elle n'en diffère que par la disposition de la

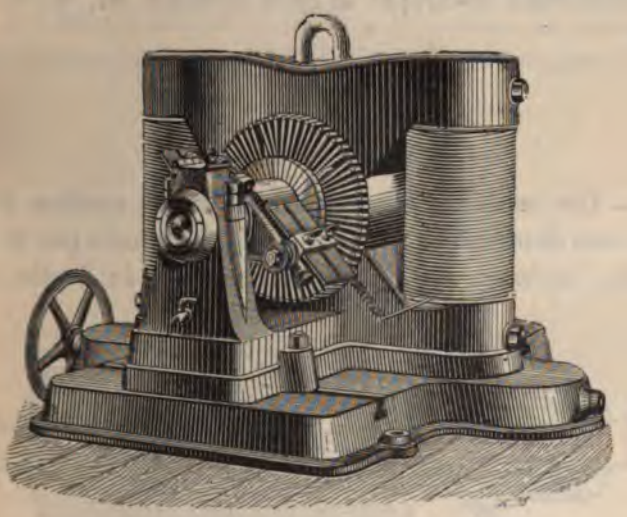


Fig. 115.

poulie, qui, au lieu d'être en dehors du palier, se trouve entre celui-ci et l'induit ; cette disposition diminue les pertes par frottement résultant de la commande.

Les types plus puissants sont construits avec quatre pôles.

De même que la machine Manchester, la dynamo Brown présente des qualités sérieuses au point de vue pratique ; elle est bien fabriquée et possède un rendement électrique très élevé que les constructeurs évaluent à 96,5 p. 100.

192. Dynamo Phœnix. — Nous terminerons la description des principales machines dérivées de celle de Gramme en parlant de la dynamo Phœnix, à laquelle ses constructeurs, MM. Paterson et Cooper, ont donné une certaine réputation.

Le dernier type de cette dynamo est analogue au type supérieur

de Gramme. Les inducteurs sont faits d'une seule pièce de forge; leurs bobines, de forme rectangulaire, sont enroulées sur un corps en tôle de fer avec des joues en cuivre. L'induit est un anneau Gramme; son noyau est formé par des tôles de fer au bois, séparées par du papier verni à la gomme-laque et réunies par des boulons isolés.

Le rendement électrique de cette dynamo est, dit-on, de 94 p. 100.

DYNAMOS SIEMENS

193. — Les machines électriques à courant continu désignées sous le nom de machines Siemens ont été imaginées par M. Hefner-Alteneck, ingénieur de la maison Siemens, de Berlin; elles se

Fig. 116.

distinguent des dynamos Gramme par la forme de l'induit, qui est une application de l'armature Siemens découverte en 1856.

Cet induit (fig. 116) se compose d'un noyau cylindrique en fer; le fil est enroulé dans le sens longitudinal et seulement sur la partie extérieure du cylindre. On évite ainsi la perte due à la résistance de la partie inférieure des bobines dans l'anneau Gramme, mais les portions de fil qui se croisent sur les deux bases du cylindre sont encore sans action utile. Pour diminuer cet inconvénient, on a augmenté la longueur du cylindre. L'armature a le défaut de ne pouvoir être construite en plusieurs parties et d'avoir un enroulement compliqué, ce qui rend les réparations plus difficiles. La machine présente un collecteur et un commutateur analogues à ceux de l'anneau Gramme.

L'armature représentée en perspective par la figure 116 est divisée en huit bobines, dont la figure 117 indique les communications avec le collecteur. Ces bobines ont leurs seize bouts désignés par les chiffres 1. 2. 3..... 8. 1'. 2'..... 8'; la première commence par 1 et finit par 1'; la deuxième commence par 2 et finit par 2', etc.....

Soient *a* et *e* les deux lames du collecteur en contact avec les balais. Les deux courants induits dans l'armature qui, comme dans l'anneau Gramme, viennent s'associer en quantité dans le circuit

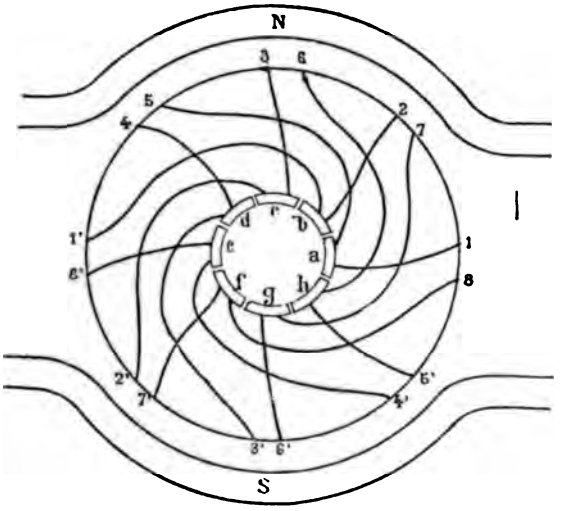


Fig. 117.

extérieur, suivent respectivement les chemins : *a* — 11' — *b* — 22' — *c* — 33' — *d* — 44' — *e*; et *a* — 55' — *h* — 66' — *g* — 77' — *f* — 88' — *e*.

Quant à l'inducteur, il est formé de deux électro-aimants dont les pôles de mêmes noms sont placés en regard, de façon à former deux champs magnétiques d'orientation inverse, l'un à la partie supérieure, l'autre à la partie inférieure de l'appareil. Ces inducteurs, composés d'une série de lames de fer, sont légèrement arqués sur la bobine et produisent ainsi un champ magnétique bien réparti.

Cette machine peut, sous cette forme, être employée dans les différentes applications de l'électricité, lumière, transport de la

force, galvanoplastie ; il suffit pour cela de faire varier les dimensions relatives des organes et des fils induit et inducteur.

Dans la première forme donnée aux machines Siemens, forme qu'elles ont d'ailleurs conservée longtemps, les inducteurs étaient disposés soit horizontalement, soit verticalement.

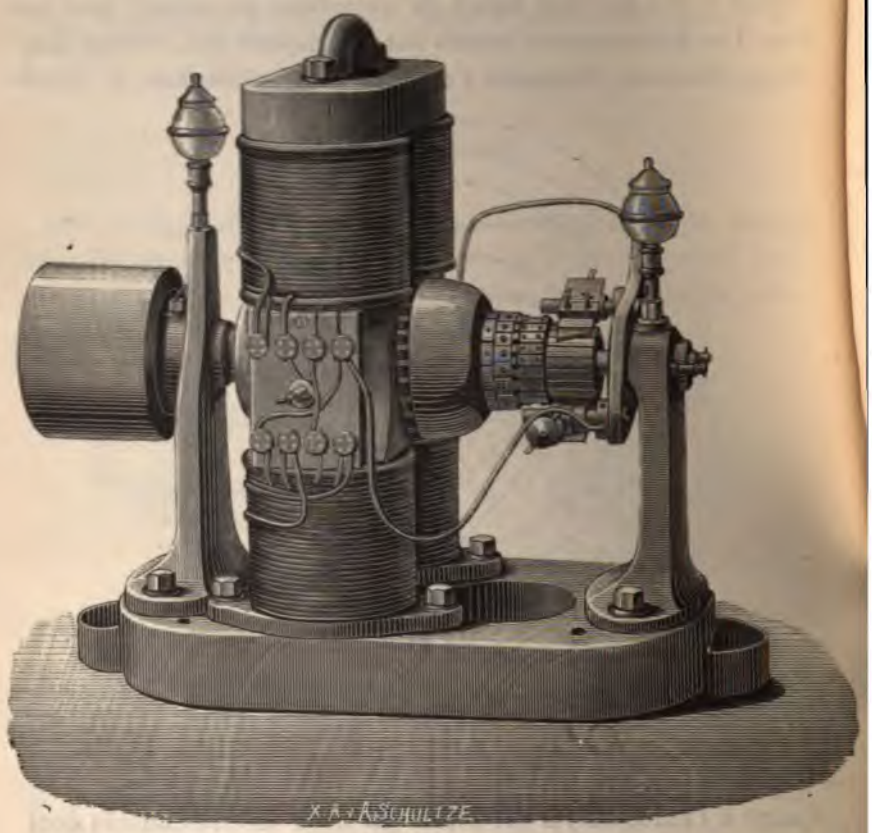


Fig. 118.

Les modèles actuels de la maison Siemens sont à type vertical ; l'un rappelle beaucoup le type supérieur de Gramme ; l'autre à électros doubles est représenté (fig. 118).

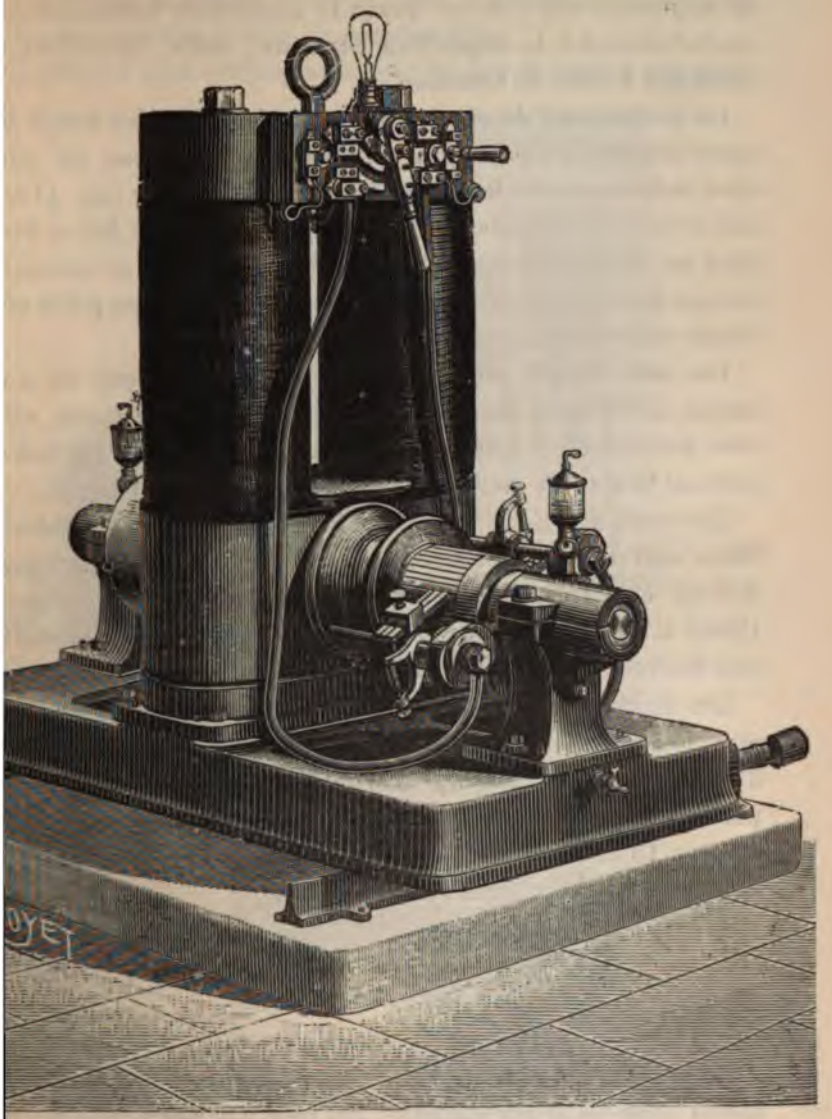


Fig. 119.

DYNAMOS EDISON

4. — Les machines Edison ne présentent dans leur construc-
aucun principe particulier. Le noyau de l'armature est formé

de disques de tôle ; sur ce noyau le conducteur induit est enroulé conformément à la disposition Siemens ; enfin, le collecteur est identique à celui de Gramme.

La particularité de ces machines consiste dans les fortes dimensions données à l'inducteur. Ce dernier se compose, en effet, de deux bobines verticales d'une très grande hauteur (fig. 119), réunies à leurs extrémités supérieures par un bloc de fer et formant ainsi un électro-aimant très puissant. Ces bobines se terminent en bas par deux pièces massives de fer qui constituent les pôles magnétiques entre lesquels se meut l'armature.

Les bobines qui composent l'anneau induit sont en nombre impair, à l'inverse des autres machines. De cette façon, elles ne sont pas diamétralement opposées deux à deux, et les balais ne peuvent jamais en mettre qu'une à la fois en court circuit.

Les machines Edison ont une très faible résistance intérieure. Elles sont destinées à l'éclairage électrique à incandescence et doivent être employées avec des lampes disposées en quantité. Quant à l'excitation des inducteurs, elle est toujours produite par une dérivation du courant de la machine.

Les dynamos Edison sont toutes construites sur le même principe. Cependant dans un modèle établi par M. Picou, aux ateliers d'Ivry, l'induit est compris entre quatre électros verticaux de forme plus ramassée que celle des précédents. Cette machine, qui pèse environ 10 tonnes, débite, à la vitesse de 350 tours par minute, un courant de 800 ampères sous 125 volts.

DYNAMO THURY

195. — Les dynamos Thury (fig. 120) sont multipolaires, du moins pour les types puissants, qui sont à 6 pôles.

Les électro-aimants, formés de plaques en fer plat, sont disposés suivant les côtés d'un hexagone, aux sommets duquel sont placées les bobines de l'armature. L'excitation est faite, soit complètement en dérivation avec un potentiel variable réglé par un régulateur, soit avec double enroulement compound et un potentiel constant. L'enroulement de la bobine, qui est de grand diamètre, est ana-

logue à celui de la bobine Siemens, dont il diffère cependant par le couplage et par des détails de construction.

Ces machines sont remarquables par le peu de travail intérieur

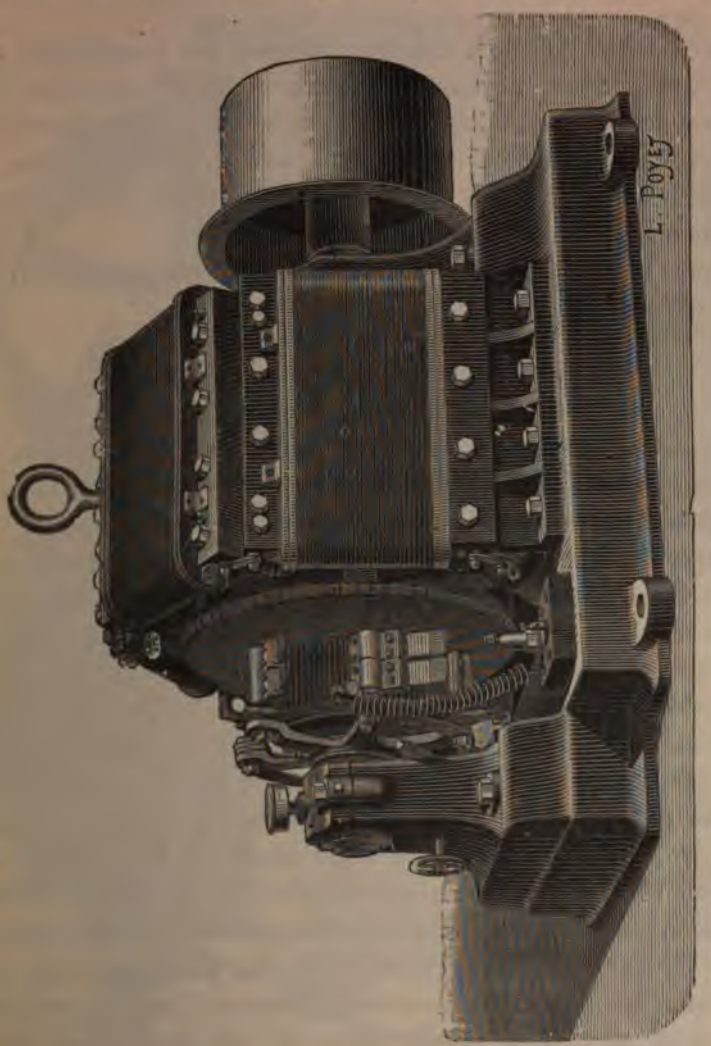


Fig. 120.

qu'elles absorbent, par leur faible poids et leur vitesse qui ne dépasse pas 600 tours.

Elles sont appliquées aux environs de Lyon et de Genève pour l'éclairage et le transport de la force; on s'en sert beaucoup pour l'éclairage des navires.

DYNAMO RECHNIEWSKY

196. — Cette dynamo à armature Siemens est caractérisée par la construction des noyaux inducteurs et induits qui sont faits en lames de fer doux, minces, isolées entre elles. Cette disposition réduit les courants de Foucault dans une grande proportion et diminue beaucoup le poids de la machine qui est très légère à cause de la bonne utilisation des matériaux.

Suivant la puissance, la machine a deux ou plusieurs pôles.

DYNAMO SIEMENS A PÔLES INTÉRIEURS

197. — Le but que l'on s'est proposé dans la construction de ces machines est d'obtenir de faibles vitesses de rotation, de façon à accoupler directement les dynamos aux moteurs à vapeur. Ces machines coûtent naturellement plus cher que des dynamos à grande vitesse ; mais elles permettent d'économiser l'espace occupé par les transmissions ordinaires, considération importante dans les stations centrales qui sont placées généralement au milieu des villes, c'est-à-dire en des points où le terrain a un prix très élevé.

Les inducteurs, au lieu d'être à l'extérieur de l'induit, comme dans les types précédents, se trouvent à l'intérieur (fig. 121). L'induit est formé par un anneau Gramme présentant une longueur très faible relativement à son diamètre. La machine est multipolaire et comporte autant de balais que de pôles ; celle que nous décrivons est à 6 pôles. L'enroulement est formé de lames de cuivre placées sur champ et présente cette particularité que les lames situées sur la circonférence extérieure de l'anneau sont plus épaisses et servent en même temps de collecteurs. Les balais viennent donc frotter sur l'anneau lui-même.

Le fer des inducteurs forme une espèce d'étoile dont le noyau est un prisme hexagonal en fonte fixé au bâti du moteur à vapeur et évidé pour le passage de l'arbre. Les branches de l'étoile sont en fer et de section quadrangulaire ; elles se terminent par un

segment cylindrique qui retient la bobine et dont la surface extérieure constitue la face polaire.

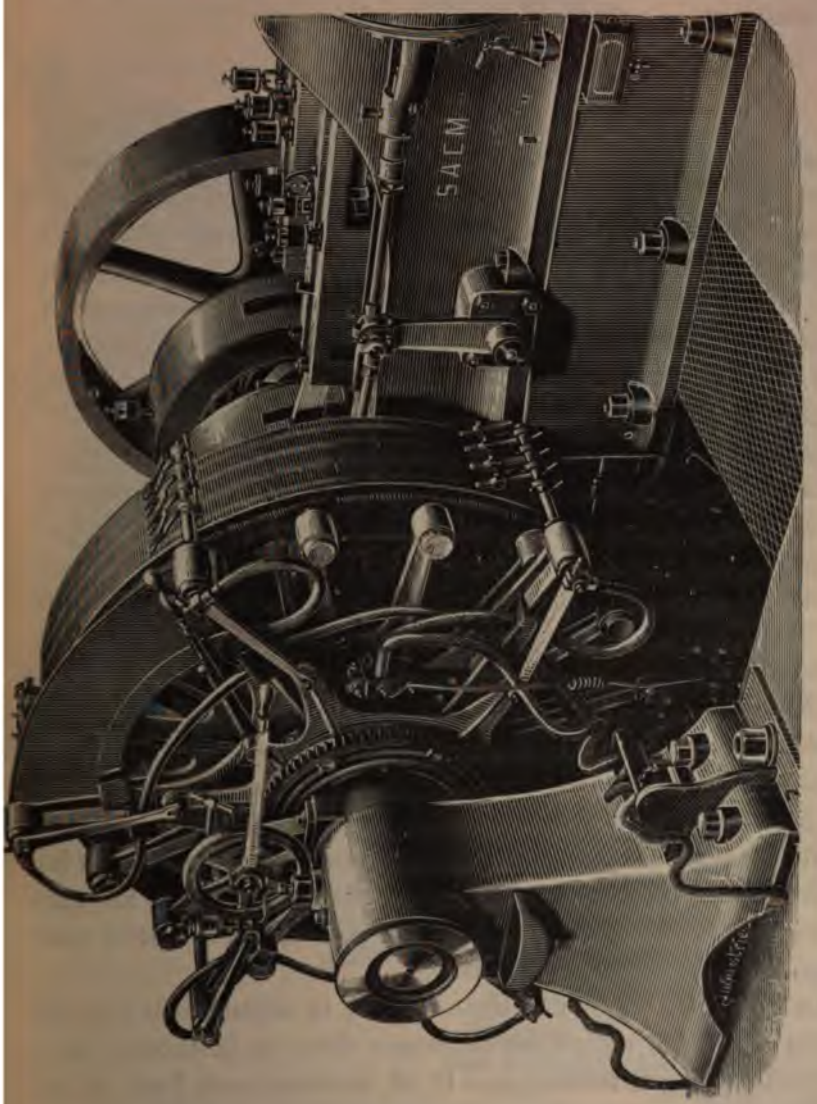


Fig. 121.

L'inconvénient de ce genre de machines est que la réfection du collecteur entraîne nécessairement celle de l'armature entière. Il est vrai, d'un autre côté, que la largeur du collecteur est très

grande par rapport à celle des balais, de sorte qu'on peut changer souvent la surface frottante.

Ces dynamos sont construites par la *Société alsacienne de constructions mécaniques.*

DYNAMO DESROZIERS

198. — Le disque qui constitue l'induit de cette dynamo tourne entre deux séries d'électros qui forment un certain nombre de champs contraires, et qui, en raison du peu d'épaisseur de ce disque, peuvent être très rapprochés l'un de l'autre. Il en résulte que la résistance magnétique de l'espace interpolaire est très faible et qu'il n'est pas nécessaire d'employer un noyau de fer dans l'induit, d'où suppression des courants de Foucault. C'est là le principal avantage de ce genre de machines.

La figure 122 représente une dynamo à 6 pôles.

Les fils de l'induit sont disposés en partie suivant des fractions de rayons comprises entre deux circonférences concentriques, et en partie, comme nous le verrons plus loin, suivant deux séries de développantes de cercles. Une de ces séries comporte les fils qui réunissent entre elles les extrémités des parties radiales sur la circonférence extérieure; l'autre, les fils qui réunissent les extrémités des parties radiales sur la circonférence intérieure.

Ne considérons d'abord que les parties radiales des fils (fig. 123); elles se trouvent dans un champ divisé en six zones dans lesquelles les lignes de force ont des directions successivement contraires et dont les lignes de séparation OA, OB, OC, etc., représentent les régions pour lesquelles l'intensité du champ est nulle ; les axes de symétrie O*a*, O*b*, O*c*, etc., sont, au contraire, les régions pour lesquelles cette intensité est maxima.

La droite OA étant une ligne neutre, le déplacement d'un fil radial dans cette région ne développe dans ce fil aucune force électromotrice. A mesure que le fil avancera vers l'axe O*a* de la première zone, une force électromotrice se produira et ira en croissant; puis cette force diminuera pour redevenir nulle quand le fil sera en OB. La force sera ensuite de sens contraire et croissante en valeur absolue jusqu'en O*b*, puis elle diminuera jusqu'en OC,

ra encore nulle. Dans un tour complet les mêmes phases
iront trois fois.

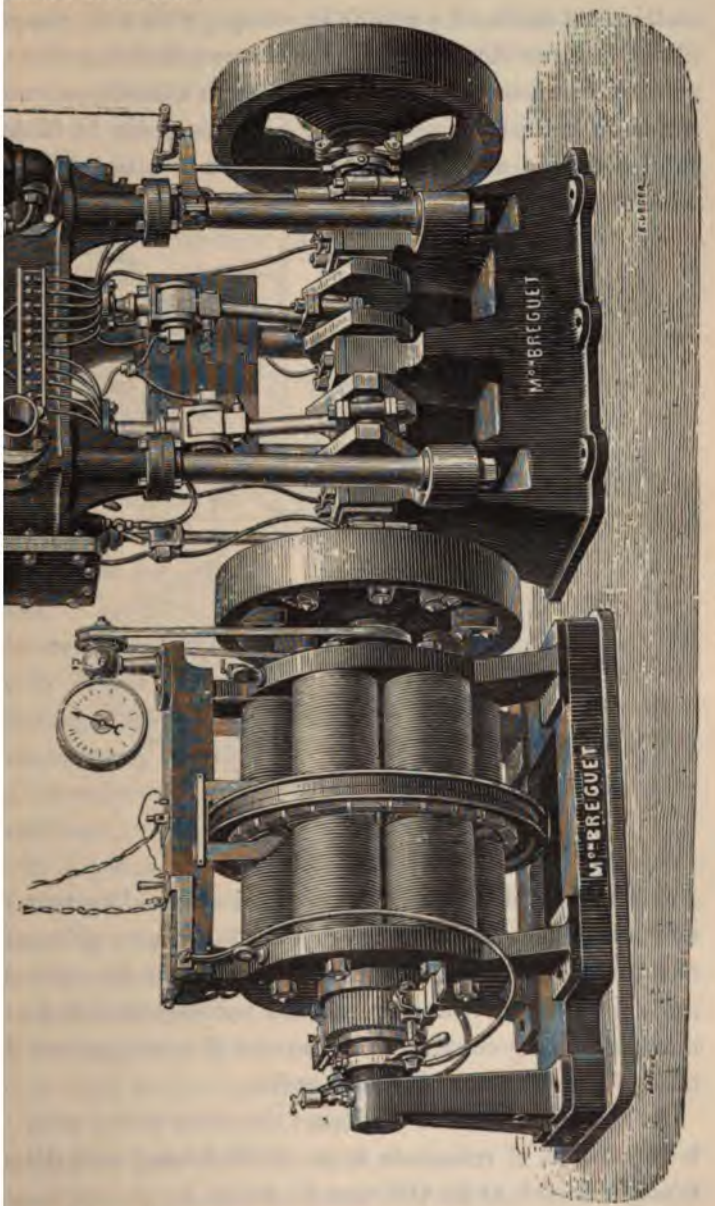


Fig. 122.

t fonctionne avec une seule paire de balais, et tous les fils
iés en série, comme dans une machine bipolaire ordinaire.

Le programme consiste donc à former deux séries de fils, partant l'une et l'autre d'un fil commun pour lequel la force électromotrice est nulle ; à partir de là, chaque série doit comprendre des fils où la force électromotrice ira en croissant d'un fil à l'autre jusqu'à un maximum, puis diminuera jusqu'à un fil commun aux deux séries où cette force sera nulle. Autrement dit, le fil de départ et celui d'arrivée des deux séries doivent être sur deux des rayons d'induction nulle ; et les fils qui doivent former les deux séries

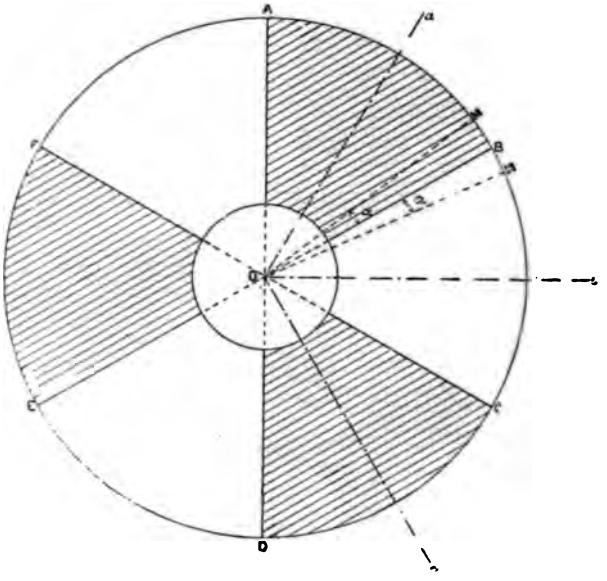


Fig. 123.

doivent être reliés dans un ordre tel qu'ils s'écartent successivement de plus en plus de ces rayons, jusqu'à ce qu'on arrive, pour chaque série, à un fil qui passe par le milieu du segment. A partir de là les fils doivent se rapprocher successivement du rayon d'induction nulle pour arriver au dernier fil commun aux deux séries où la force électromotrice est nulle.

Adoptons comme fil de départ des deux séries celui qui est sur le rayon OA, et relions-le à un fil OM faisant avec OB un angle α. L'angle de OA et de OM sera de $60 - \alpha$.

Plaçons sur l'induit, à partir de OM, une série de fils faisant respectivement entre eux l'angle $60 - \alpha$, et relions-les succes-

sivement l'un à l'autre ; le second fil fera avec OA l'angle 2 (60 — α), le troisième l'angle 3 (60 — α), le fil de rang n l'angle n (60 — α). Ces fils se rapprocheront donc constamment de l'axe d'une des zones, et la force électromotrice induite ira en croissant d'un fil à l'autre jusqu'à ce que l'un d'eux se trouve sur un de ces axes. A partir de ce moment les fils s'éloigneront de l'axe et la force diminuera. L'une des conditions du programme est donc remplie.

Il suffit pour cela d'exprimer que l'angle que fait le fil de rang n avec OA est égal à un nombre impair de demi-circonférences, d'où l'égalité :

$$(n - 1)\, 60^\circ = (2k + 1) \times 180^\circ$$
$$n - 1 = 6k + 3.$$

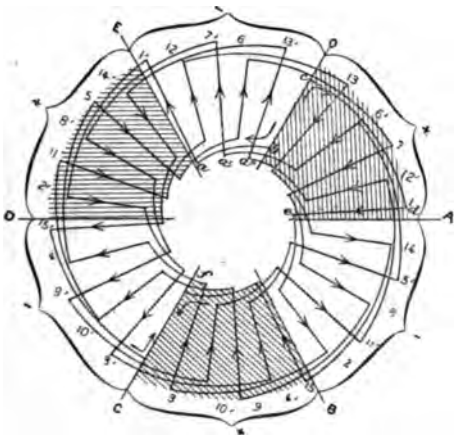


Fig. 124.

La seconde condition du programme se trouve donc également remplie par cette combinaison.

Considérons la figure 124, les segments sont tels que dans les champs positifs, par exemple, les courants induits vont de la circonférence au centre, et dans les négatifs du centre à la circonférence.

Dans le fil 0, qui est à la limite de deux segments, il n'y a aucun courant. Dans le fil 1 le courant va de la circonférence au centre, il sera réuni à la suite du fil 0 par la circonférence extérieure.

Dans 2, le courant marche du centre à la circonférence ; on le réunira à 1 par la circonférence intérieure. On procédera de même pour 3, 4, 5, jusqu'à ce qu'on arrive au point C. Les connexions, comme on le voit, se font alternativement à l'intérieur et à l'extérieur.

En repartant du point 0, nous opérerons pour la série 0, 1′, 2′, 3′..... comme pour la précédente. Dans 1′ le courant allant du centre à la circonférence, on réunit ce fil au fil 0 par la circonférence intérieure, etc...

La figure montre que les connexions intérieures et extérieures vont alternativement à droite et à gauche dans chacune des deux séries de connexions, et que les parties radiales sont réunies entre elles à l'intérieur et à l'extérieur par des arcs de développante égaux et parallèles. Il n'existe aucun croisement de fils.

Dans la pratique, l'enroulement se divise entre deux plateaux que l'on fixe de chaque côté d'un disque métallique porté par l'arbre de la machine. La figure 125 montre la répartition des fils

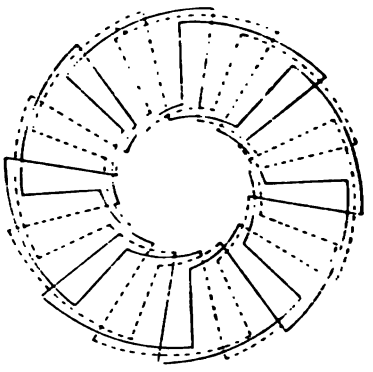


Fig. 125.

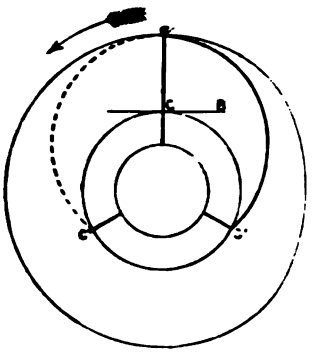


Fig. 126.

sur chaque plateau. Les traits pleins, par exemple, indiquent les fils du plateau avant ; les traits pointillés, ceux du plateau arrière.

De même que dans les machines ordinaires, l'induit est réuni au collecteur par tous les points limitant deux sections consécutives, a, a', a'' (fig. 124). Mais la disposition multipolaire de la machine et l'enroulement en série des fils de l'induit obligent à intercaler entre l'induit et le collecteur un appareil nommé *connecteur*.

Considérons, par exemple, le point a figure 126. Supposons qu'il corresponde à des fils ayant une force électromotrice nulle, et que les courants induits qui tendent à se former dans l'ensemble des fils induits partent de ce point ; il doit être réuni à la lame C du collecteur qui est sous le balai B par lequel entre le courant. Quand tout le système a fait un tiers de tour, le point a, et lui seul, est encore dans les mêmes conditions par rapport aux mêmes fils de force électromotrice nulle, puisque ces fils occupent la

même position relativement à un pôle de même nom ; il doit encore être l'origine des courants traversant l'induit et doit être réuni à la lame qui est sous le même balai B par lequel entre le courant. Or à ce moment, c'est la lame C′, en retard de 120° sur C, qui est sous le balai B ; le point a doit donc aussi être réuni à C′. De même, quand le système a fait deux tiers de tour, a se retrouve encore une fois dans les mêmes conditions, il doit encore être réuni à la lame qui est en ce moment sous le balai B ; cette lame est C″ qui est de 240° en arrière de C ou de 120° en avance.

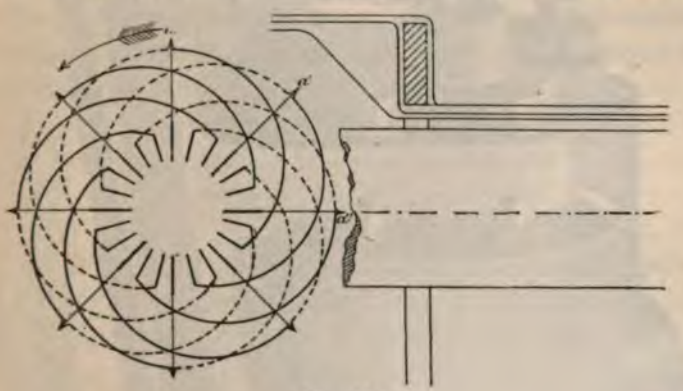


Fig. 127.

Il en est de même pour chacun des points a', a''... etc. Chacun d'eux doit être réuni à 3 lames du collecteur placées à 120° les unes des autres. Il en résulte que le nombre des lames du collecteur est trois fois plus grand que celui des points à réunir au collecteur.

Le connecteur, représenté schématiquement figure 127, sert à faciliter et à régulariser les connexions des points a, a', a'' avec le collecteur. Cet appareil comporte un cylindre en bois sur lequel est monté un plateau également en bois. Les fils qui vont directement de l'induit au collecteur traversent simplement le plateau ; ceux qui se rendent à la lame placée à 120° à droite s'arrêtent sur la face avant du plateau, parcourent une développante qui les amène en face de cette lame, et se redressent suivant une génératrice du cylindre pour aller s'y souder. Enfin, les fils devant se rendre à la lame placée à 120° à gauche traversent le plateau, parcourent sur la face arrière une développante égale et de sens con-

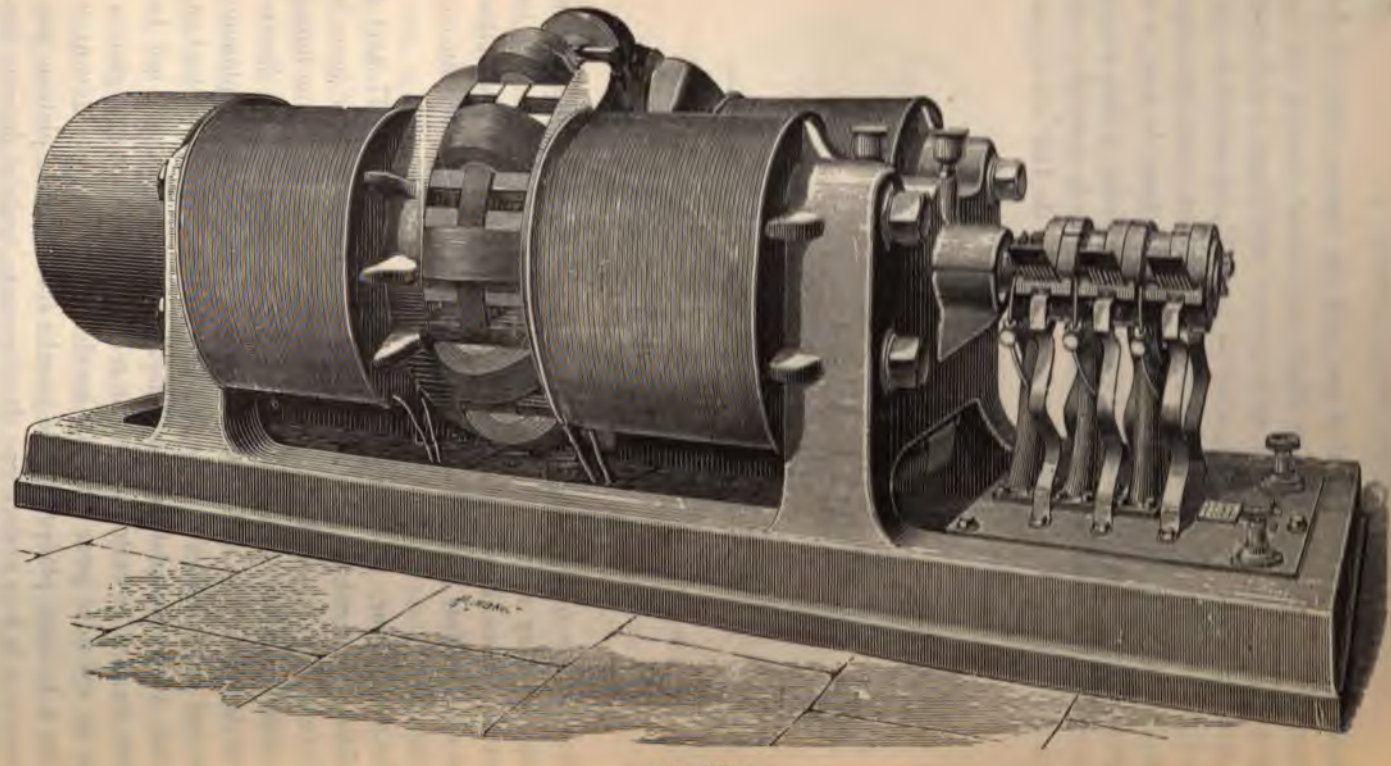


Fig. 128.

traire à celle d'avant, et se redressent pour aller au collecteur. Les croisements de fils sont évités de cette façon.

En outre de l'avantage résultant de la suppression des pertes d'énergie dues aux courants de Foucault, les dynamos Desroziers permettent d'obtenir une ventilation très active qui dissipe l'échauffement de l'induit ; de plus, comme on peut sans inconvénient augmenter le diamètre du disque, une même longueur de fil donnera pour le circuit induit une section utile plus grande ; il est donc facile de réduire la vitesse angulaire et par suite d'actionner directement la machine par le moteur, sans transmission intermédiaire. Malgré ces avantages, cette machine n'est pas encore très répandue dans l'industrie.

MACHINES A COURANTS REDRESSÉS

DYNAMO BRUSH

199. — La machine Brush (fig. 128) donne des courants continus à haute tension, principalement employés pour l'éclairage électrique par les lampes à arc Brush. L'induit est mobile ; les inducteurs sont fixes.

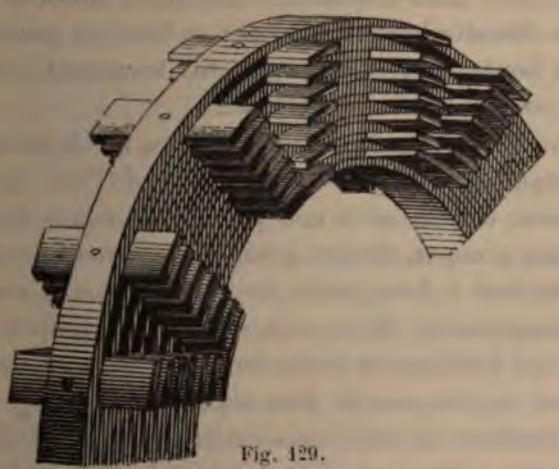


Fig. 129.

Ces derniers se composent de deux électros ; ils sont plats, à pôles épanouis, et leurs bobines sont reliées en tension. Comme dans les machines Siemens, les pôles, placés vis-à-vis l'un de l'autre et entre lesquels se meut l'induit, sont de même nom.

L'armature Brush est différente de toutes celles que nous avons vues jusqu'ici.

Son noyau est formé par une couronne de fer (fig. 129) obtenue en enroulant en spirale un long ruban de tôle de $1^{mm},5$ d'épaisseur; entre les différentes couches de ce ruban et suivant les extrémités de quatre diamètres, on intercale des séries de petites lames en fer de même épaisseur, qui dépassent le ruban de part et d'autre; dans les intervalles qu'elles forment se logent les bobines induites. Le tout est maintenu par des boulons isolés placés radialement.

Cette disposition a l'avantage d'augmenter la division de la masse métallique et de diminuer par suite les courants de Foucault. L'armature ainsi obtenue présente très peu de magnétisme rémanent, et peut être animée d'une vitesse supérieure à celle d'un modèle primitivement adopté, dont l'anneau, formé d'une couronne de fonte, était beaucoup plus compact.

L'anneau ne présente plus un enroulement continu, comme celui de Gramme. Les bobines induites, au nombre de huit, ou de douze, suivant les modèles de machines, sont enroulées dans le même sens et groupées deux à deux, les extrémités intérieures des fils des bobines diamétralement opposées se trouvant reliées l'une à l'autre. Les bouts extérieurs de ces fils traversent l'arbre de la machine et sont fixés au commutateur.

Le commutateur se compose de quatre ou de six anneaux plats en cuivre, séparés les uns des autres et isolés de l'axe. Ces anneaux communiquent chacun avec une paire de bobines et sont disposés en deux groupes, chaque groupe comprenant deux anneaux qui correspondent à deux paires de bobines placées sur des diamètres rectangulaires. Enfin, chacun de ces groupes comporte deux balais qui touchent en même temps les deux anneaux.

Un anneau se compose de deux segments A, B (fig. 130) auxquels sont attachées les extrémités extérieures du fil de la paire de bobines correspondante, et d'un segment isolé C égal à un huitième de circonférence. Lorsque ce segment se trouve en face d'un des balais, la paire de bobines est mise hors de circuit. Comme il y a deux balais, cette mise hors de circuit arrive deux fois par tour et, d'après la disposition de la machine, elle a lieu au moment

où les deux bobines sortent d'un des champs magnétiques inducteurs pour entrer dans l'autre, c'est-à-dire pendant la période d'inactivité. De cette manière, la résistance de ces bobines se trouve supprimée lorsqu'elles sont dans la zone neutre, où elles ne produisent aucun courant et où même elles en absorbent.

Les anneaux du commutateur accolés l'un à l'autre correspondent, comme nous l'avons vu, à des paires de bobines rectangulaires. Les segments isolés C, C′ occupent eux-mêmes des positions rectangulaires. Il suit de là que, pendant une révolution de l'armature, on a pour chaque groupe d'anneaux huit périodes successives : 1° association en quantité des deux paires de bobines ;

Fig. 130.

2° action d'une paire seule ; 3° association des deux paires en quantité ; 4° action de la deuxième paire seule, etc... De plus, quand, sur un des groupes de balais, on a une association en quantité de deux paires de bobines, on a sur l'autre l'action d'une seule paire de bobines. Les deux groupes de balais peuvent être réunis à volonté en quantité ou en tension.

L'appareil est disposé pour tirer le meilleur parti possible de ces différentes communications. Ainsi, lorsqu'une paire de bobines est seule en activité sur un groupe du commutateur, c'est qu'elle est à sa position de meilleure action, en face des pôles magnétiques du noyau. Au contraire, lorsque les deux paires de bobines se trouvent occuper des positions intermédiaires entre celle de meilleure action et la zone neutre, elles sont associées en quantité. Enfin, il y a toujours une paire de bobines hors de circuit, celle qui se trouve dans la région neutre. Cette précaution est nécessaire ; car si cette paire restait dans le circuit au moment où elle est inactive, elle offrirait au courant produit par les autres bobines une voie dérivée et serait une cause de pertes.

En résumé, comme l'a expliqué le professeur S. Thompson, on

peut dire que les quatres paires de bobines de la machine Brush constituent réellement quatre machines séparées, dont chacune fournit au commutateur des courants alternatifs. Le commutateur redresse ces courants et les envoie dans les balais ; ces quatre machines se trouvent d'ailleurs réunies par groupes de deux, et ces groupes peuvent encore être unis soit en tension, soit en quantité.

La figure 128 représente la machine de 60 lampes à arc, construite à Londres par la *Anglo-American Electric Light Corporation*

DYNAMOS THOMSON-HOUSTON

200. Dynamo pour lampes à arc. — La machine Thomson-Houston, fort employée en Amérique depuis 1883 et introduite assez récemment en Europe, présente des dispositions tout à fait particulières. Elle donne une solution simple de la distribution du courant électrique à des appareils reliés en série ; car l'intensité du courant qu'elle produit est indépendante du nombre de ces appareils et aussi, dans une certaine mesure, de la vitesse de rotation de la machine.

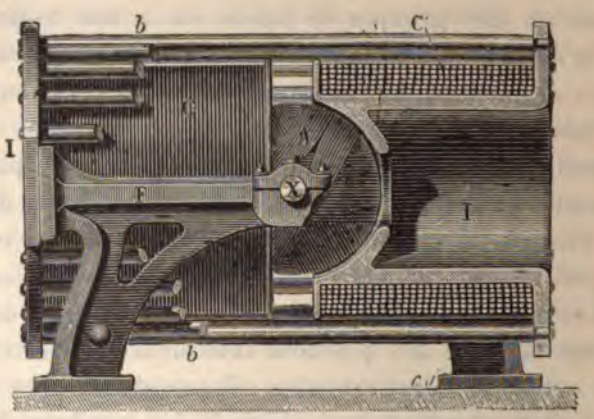


Fig. 131.

L'inducteur (fig. 131) est formé de deux bobines C, C′, enroulées sur des cylindres creux et placées dans le prolongement l'une de l'autre, ne laissant entre elles que le vide nécessaire au passage de l'arbre de l'induit. Les cylindres sont terminés, à l'intérieur

par des surfaces concaves entre lesquelles est placé l'induit, et à l'extérieur par deux anneaux réunis l'un à l'autre par des barres de fer ; ces barres ont pour objet de mettre le champ magnétique à l'abri des influences extérieures, de maintenir solidement les deux parties de l'inducteur et enfin de protéger ses bobines. La machine est excitée en série.

L'induit, placé entre les deux cylindres, a la forme d'une sphère légèrement aplatie. Son noyau (fig. 132) est composé de deux coquilles en fonte S, S, réunies par de petites barres de fer *d*, *d* ; sur la carcasse ainsi obtenue on enroule le fil de fer W, qui constitue le noyau de l'induit ; puis on recouvre de papier isolant et l'on procède à l'enroulement de l'induit.

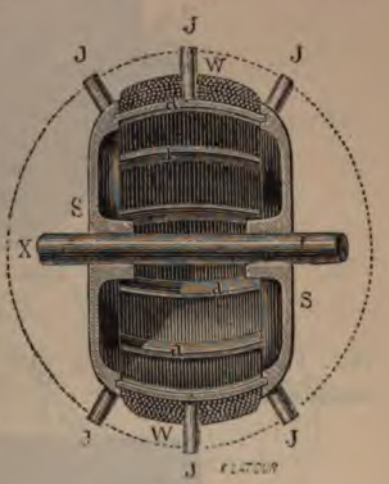


Fig. 132.

L'induit comprend seulement trois bobines. Pour que ces trois bobines aient la même résistance électrique et subissent les mêmes actions d'induction, on enroule autour des chevilles en bois J, J servant à guider et à retenir les fils : 1° la moitié de la première bobine ; 2° la moitié de la seconde ; 3° toute la troisième bobine ; 4° l'autre moitié de la seconde ; 5° l'autre moitié de la première. On obtient ainsi une sphère que l'on maintient par de gros fils en laiton *g*, *g* (fig. 133).

Au point de vue du fonctionnement, les trois bobines de l'induit représentent trois anneaux circulaires, calés à 120 degrés l'un de l'autre (la figure 134 les représente réduits, chacun à leur spire moyenne), et comme telles, elles sont, lorsqu'elles tournent, traversées par un courant changeant de sens toutes les fois qu'elles passent par le plan perpendiculaire à l'axe des deux inducteurs, c'est-à-dire deux fois par tour.

Il s'agit alors de recueillir les courants produits par les trois bobines et de les redresser chaque fois qu'ils changent de sens dans l'une d'elles : c'est à cet usage qu'est destiné le collecteur.

Celui-ci se compose de trois segments de cuivre isolés les uns des autres et occupant chacun le tiers de la circonférence; chacun de ces segments est relié au bout finissant des fils des bobines

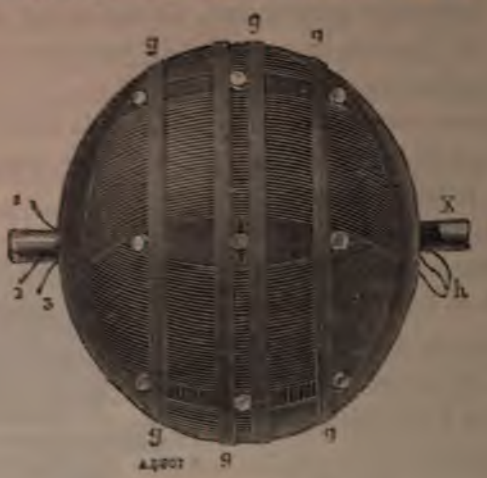


Fig. 133.

(fig. 133 et 134), tandis que les trois bouts commençants sont soudés en *h*.

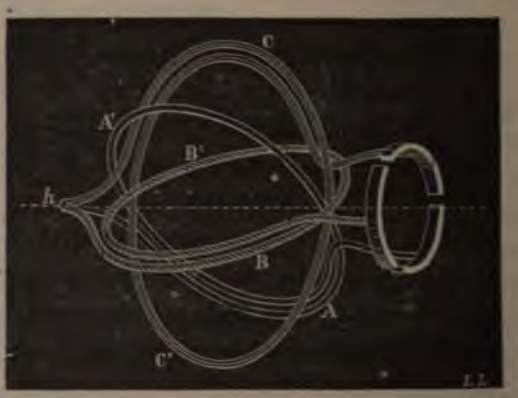


Fig. 134.

Sur ce collecteur frottent quatre balais (fig. 135), reliés électriquement deux à deux, B_1 avec B_2, B_3 avec B_4. On a ainsi deux paires de balais qui constituent les bornes positive et négative de la machine. Les intervalles qui séparent les balais sur le collecteur sont de 60 degrés entre deux balais de même nom, et de

120 degrés entre deux balais de noms contraires. De cette manière les trois bobines sont toujours en circuit ; deux d'entre elles sont réunies en quantité, et leur ensemble est relié en tension avec la troisième. (Dans le cas de la figure, 1 et 2 unies en quantité sont en tension avec 3.)

Lorsqu'on éteint un certain nombre de lampes sur le circuit

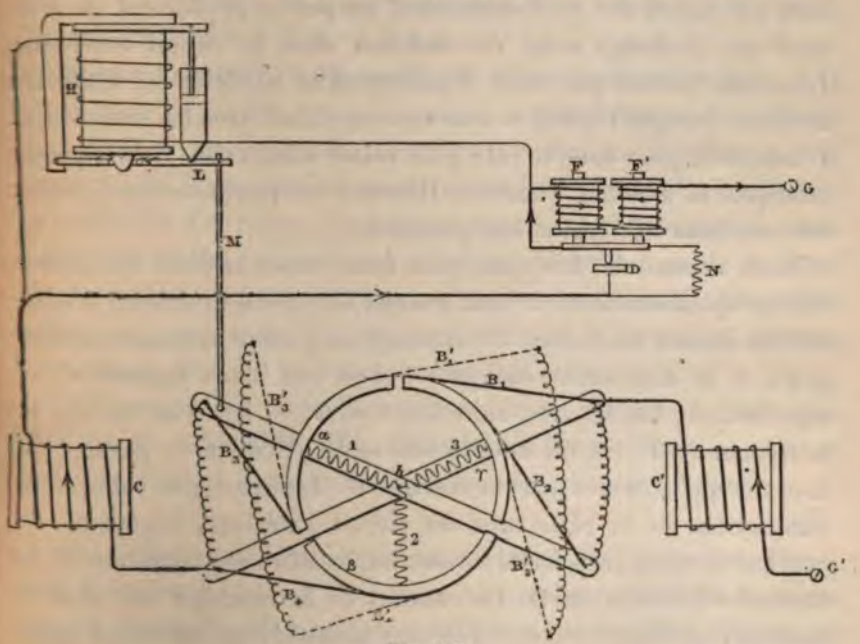


Fig. 135.

extérieur, la force électromotrice du courant devient trop forte; on la ramène à sa valeur normale en décalant les balais, les deux balais de chaque paire étant déplacés en sens inverse l'un de l'autre, de manière que leur intervalle devienne supérieur à 60 degrés (cette nouvelle position est indiquée en traits pointillés sur la figure 135). Les balais de noms contraires se trouvent alors à moins de 120 degrés, c'est-à-dire de la longueur d'un segment du collecteur. Il résulte de là que, à ce moment, les trois bobines de l'induit sont en court circuit. En effet, si nous partons du point de jonction h des trois bobines, le courant arrive au segment α, d'un côté directement par la bobine 1, de l'autre par la bobine 2, le segment β, le balai B'_4 et le balai B'_3; puis du segment α, il passe

dans le balai B'_1, le balai B'_2, le segment γ, la bobine 3 et revient au point h ; la production de la machine se trouve ainsi arrêtée, et l'interruption est d'autant plus longue que le décalage des balais a été plus grand.

Mais, bien qu'il ne soit plus alimenté par les bobines, le circuit extérieur reçoit encore un courant. En effet, à chaque court circuit, les inducteurs se désaimantent un peu et produisent un courant qui prolonge celui des bobines dans le circuit extérieur. L'énergie perdue par cette désaimantation partielle est d'ailleurs restituée lorsque l'induit se retrouve en circuit avec les inducteurs. L'inducteur joue donc le rôle d'un volant d'intensité ; cela explique pourquoi la dynamo Thomson-Houston ne peut fonctionner avec une machine excitatrice indépendante.

Nous venons de dire que, pour faire varier la force électromotrice proportionnellement aux besoins du circuit extérieur, il suffisait de décaler les balais. Ce décalage se produit automatiquement grâce à la disposition indiquée figure 135, dans laquelle C, C' représentent les électros inducteurs et G, G' les deux bornes de la dynamo. FF' est un double solénoïde placé sur le passage du courant qui y arrive par le contact D. Lorsque, par suite de la diminution de la résistance du circuit extérieur, l'intensité du courant devient trop forte, ce solénoïde attire son armature et le contact est rompu en D. Le courant de la machine suit alors le chemin pointillé et traverse l'électro-aimant H qui attire son armature L. Celle-ci agit, par l'intermédiaire de la tige M, sur une barre rigide portant les deux balais B_2, B_3 et mobile autour de l'axe de l'induit, et fait tourner ces balais dans le sens de la flèche. En même temps, elle agit, par un système de leviers, sur une autre barre à laquelle sont fixés les balais B_1, B_4, et imprime à ces derniers un mouvement en sens inverse.

Pour éviter les brusques déplacements de l'armature L et, par suite, des balais, on a placé sur cette armature une petite pompe mobile à glycérine, dont le piston est fixe et qui amortit les mouvements de tout le système. En pratique, la position des noyaux F, F' est telle que le contact D subit une sorte de frémissement continuel et ne laisse passer dans H qu'une partie du courant principal. Une résistance en charbon N, établie en dérivation sur le

contact D, atténue les effets nuisibles des étincelles qui se produisent en D.

Chaque nouvelle variation d'intensité résultant des variations de résistance du circuit extérieur détermine dans l'ensemble des organes de régulation une nouvelle position d'équilibre qui ramène l'intensité à sa valeur normale. Le réglage est très rapide et très sûr, et a l'avantage de s'appliquer aussi bien lorsque la vitesse de la machine présente des variations.

Chaque fois qu'un balai quitte un segment du collecteur, il se produit une étincelle. Pour éviter que ces étincelles mettent le collecteur hors de service, M. Thomson y a fixé un insufflateur d'air qui est relié à un ventilateur placé sur la machine. Ce ventilateur a pour effet d'envoyer, six fois par tour, un jet d'air sur les extrémités des balais, au moment où chaque segment quitte le balai. On peut alors graisser le collecteur sans inconvénient, et le refroidissement produit par les jets d'air empêche la formation d'un arc permanent entre les segments voisins du collecteur.

La dynamo Thomson-Houston possède, comme on voit, une très grande originalité. Elle alimente des lampes à arc en série et est spécialement destinée à l'éclairage des voies publiques.

201. Dynamo pour lampes à incandescence. — La dynamo Thomson-Houston destinée à l'éclairage à incandescence offre le même aspect extérieur que la machine étudiée ci-dessus, mais elle en diffère par de nombreux points. Le système de décalage des balais et le ventilateur sont supprimés. L'induit, dont le noyau est formé de disques annulaires de tôle douce superposés, présente l'enroulement Siemens. Le collecteur est analogue à celui de Gramme. Enfin l'inducteur possède un double enroulement destiné à assurer la constance de la différence de potentiel aux bornes.

MACHINES A COURANTS ALTERNATIFS

MACHINE MAGNÉTO DE MÉRITENS

202. — La machine à courants alternatifs de M. de Méritens est une des rares magnétos qui soient encore employées.

L'armature, qui est mobile, est formée de 80 bobines réparties sur 5 anneaux parallèles (16 sur chaque anneau) portés par l'arbre de couche. Extérieurement à la circonférence de chacun de ces anneaux sont disposés 8 aimants permanents en fer à cheval, dont les pôles sont alternativement de noms contraires (fig. 136).

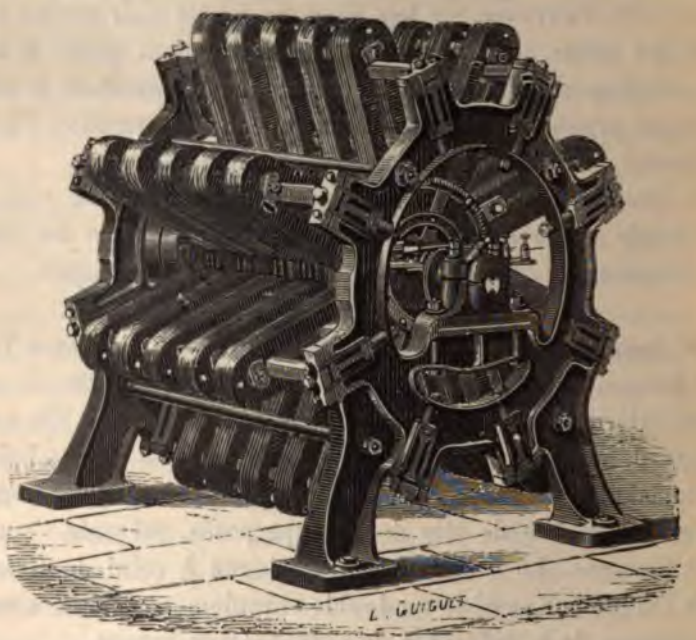


Fig. 136.

Les bobines sont enroulées dans le même sens ; sur chaque anneau elles sont réparties par groupes de quatre et accouplées dans chaque groupe en tension, le bout finissant de la première étant relié au bout finissant de la seconde ; le bout commençant de la seconde au bout commençant de la troisième ; le bout finissant de la troisième au bout finissant de la quatrième...

Dans le mouvement de rotation de l'armature, lorsqu'une bobine s'approche du pôle nord d'un aimant, la suivante s'approche d'un pôle sud ; les courants d'induction simultanément produits dans deux bobines consécutives sont donc de sens contraires, mais ils s'ajoutent pour les bobines faisant partie d'un même groupe, grâce au mode de jonction indiqué ci-dessus.

Les vingt groupes dont se compose l'armature sont divisés en deux circuits, dans chacun desquels les dix groupes sont réunis en quantité et associent par suite leurs effets. Ces deux circuits peuvent être assemblés eux-mêmes en tension ou en quantité.

Naturellement, les courants produits par la machine se trouvent renversés chaque fois que les bobines passent d'un champ magnétique dans un autre, c'est-à-dire seize fois par tour.

Les cinq anneaux induits sont formés chacun d'une roue en bronze présentant à sa circonférence seize saillies de forme trapézoïdale, entre lesquelles se logent les bobines. L'âme des bobines est formée de quatre-vingts lames de tôle douce de 1 millimètre d'épaisseur, découpées à l'emporte-pièce. Le fil de cuivre a $1^{mm},9$ de diamètre.

Deux bagues en bronze montées sur une douille d'ébonite constituent le collecteur ; les balais, assemblés sur des lames de ressort, frottent sur ces bagues et sont en communication avec les bornes, qui sont isolées du support de la machine et auxquelles aboutissent les fils du circuit. Deux collecteurs semblables sont montés sur l'arbre.

La machine de Méritens donne une grande régularité du courant, grâce à la constance du champ magnétique.

En outre, la construction en est simple et les réparations se font aisément, les pièces avariées pouvant être remplacées sans difficulté.

C'est pour ces raisons que, malgré les inconvénients des aimants permanents, la machine de Méritens a été conservée pour les phares. Il est indispensable en effet que dans ce service les accidents soient aussi rares que possible, et que le gardien puisse faire seul la réparation.

DYNAMO GRAMME

203. — Dans les machines Gramme à courants alternatifs (fig. 137) employées pour l'éclairage par les bougies Jablochkoff, les électro-aimants inducteurs sont mobiles et l'armature est fixe. Elle a la forme d'un cylindre assez long, recouvert de fil et sectionné en bobines distinctes, comme l'anneau de la machine à courant continu. A l'intérieur de ce cylindre sont huit électro-aimants

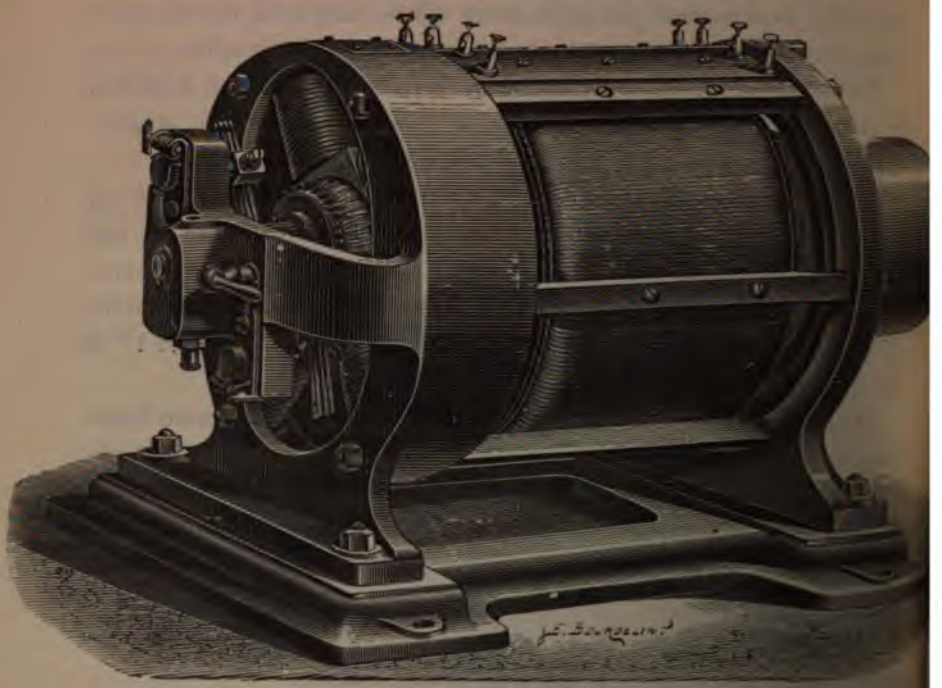


Fig. 137.

inducteurs, disposés radialement de façon que, sur la circonférence extérieure, leurs pôles soient alternativement de noms contraires.

Comme nous l'avons dit plus haut, cette disposition supprime le collecteur ; le courant excitateur est amené par deux balais à deux cercles distincts et isolés, fixés sur l'arbre de la machine, et de là il passe successivement dans les bobines des électros. Au début, ce courant provenait d'une machine séparée, ce qui compliquait les transmissions et nécessitait deux dynamos différentes. M. Gramme

a simplifié cette disposition. La machine actuelle se compose en réalité de deux machines distinctes, mais qui sont montées sur le même axe et mises simultanément en mouvement. L'une d'elles est une dynamo ordinaire à courants alternatifs, l'autre sert d'excitatrice et est à courant continu. L'installation devient ainsi plus simple et moins coûteuse.

La force motrice consommée est de 1 cheval par foyer Jablochkoff.

DYNAMO SIEMENS

204. — La dynamo Siemens à courants alternatifs repose sur le principe que nous avons exposé § 165. Elle se compose de

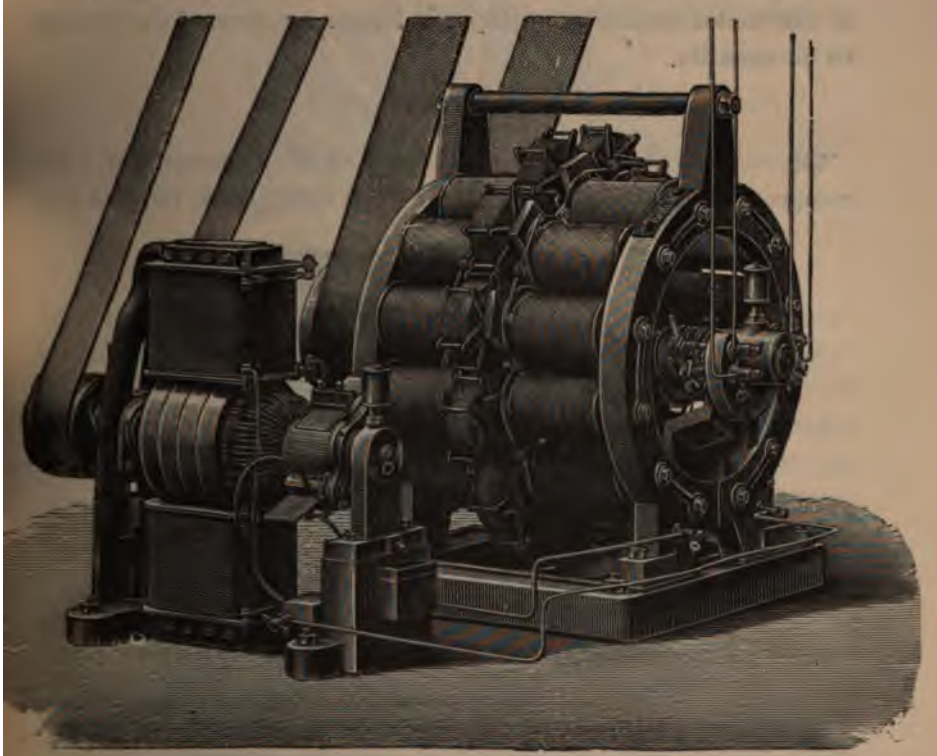


Fig. 138.

de deux rangées d'électro-aimants inducteurs fixes, disposés de façon que deux champs magnétiques successifs aient leurs orientations inverses. Les bobines induites tournent entre ces électros

(fig. 138), qui sont excités par une machine indépendante à courant continu, et leur nombre est égal à celui des champs magnétiques.

Les électros ont pour noyaux des barres rondes de fer doux sur lesquelles est enroulé le fil inducteur. L'armature mobile est formée de deux flasques métalliques, dont l'écartement est maintenu par des entretoises en bois autour desquelles est enroulé le fil induit. Cette disposition rend l'armature assez légère, et l'absence de fer empêche l'échauffement rapide de la machine. Les deux extrémités du fil induit aboutissent respectivement à deux bagues métalliques qui constituent le collecteur et sur lesquelles appuient les balais. Enfin, les bobines de l'armature peuvent être groupées de différentes manières, de façon à donner un courant de tension ou de quantité.

DYNAMO FERRANTI

205. — La dynamo de M. Ferranti et de sir W. Thomson (fig. 139) comprend une armature induite tournant entre deux rangées cir-

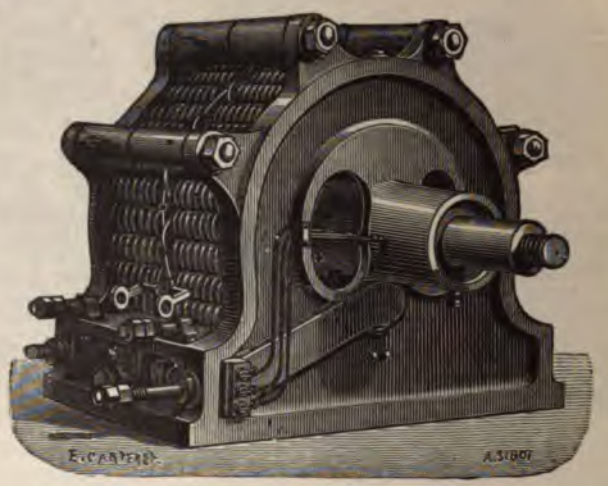


Fig. 139.

culaires d'électro-aimants inducteurs, dont les pôles sont alternativement de noms contraires.

Chaque rangée contient seize électros dont la seule particularité est leur section ovoïde ; ils sont représentés en N,S dans la

figure 140. Ils sont montés en série et excités par une dynamo indépendante.

L'armature présente une forme originale. Elle ne renferme aucune pièce de fer et se compose d'un long ruban de cuivre ayant 36 mètres de longueur, 12 millimètres de largeur et 2 millimètres d'épaisseur. Ce ruban est contourné en forme de feston suivant la courbe L, L, L (fig. 140). Le nombre de ses boucles est de huit, c'est-à-dire moitié du nombre des électros ; il s'enroule douze fois suivant cette même courbe, en formant ainsi douze couches

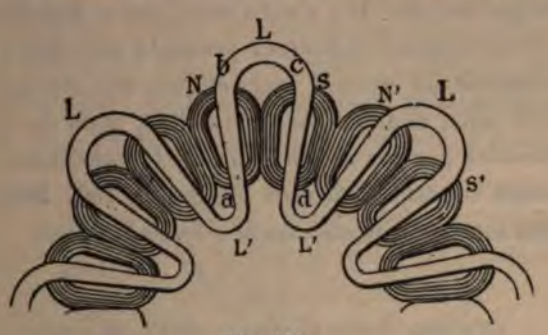


Fig. 140.

successives, isolées les unes des autres par des bandes de caoutchouc. Ses deux extrémités sont soudées à deux pièces isolées, fixées à l'axe, sur lesquelles appuient les balais.

Considérons deux parties voisines de ce ruban *ab*, *cd*. Lorsque *ab* s'approche du champ magnétique situé en face du pôle N, par exemple, *cd* s'approche d'un champ magnétique d'orientation inverse, développé vis-à-vis du pôle S. Les courants induits dans ces deux éléments sont donc de sens contraires ; mais comme les directions de *ab*, *cd* sont elles-mêmes opposées, les deux courants s'ajoutent. Il en est de même pour toutes les boucles de la courbe, et la rotation de l'armature produit un courant qu'on peut recueillir aux balais. Ce courant change de sens simultanément dans les éléments *ab*, *cd*, etc., toutes les fois qu'ils passent d'un champ magnétique dans un autre, c'est-à-dire seize fois par tour.

L'avantage de la machine Ferranti-Thomson est de posséder une armature très légère, par suite de l'absence de fer. Aussi

l'induit peut-il être animé d'une vitesse de 1900 tours, difficile à obtenir avec les autres dynamos de ce genre. Elle présente encore cette qualité d'avoir une armature de résistance très faible, 0,0265 ohm.

Dans les modèles récents, le nombre d'électros inducteurs est doublé ainsi que celui des boucles de l'induit. Les électros ne sont plus recouverts de fil, mais ils sont entourés de barres de cuivre ondulées, de façon à passer alternativement au-dessus et au-dessous du noyau de chaque électro, ce qui produit le même effet magnétique que les fils. Il y a ainsi neuf barres métalliques reliées en tension, et ce système inducteur présente une faible résistance, tout en produisant des champs magnétiques très intenses. Les frotteurs ne sont plus, dans ce cas, des balais, mais de fortes pièces de métal pressées par des ressorts contre le collecteur.

Les modèles courants peuvent alimenter 100, 200, 300, 400, 1 000 et 3 000 lampes à incandescence de 16 bougies.

DYNAMO ZIPERNOWSKY-DÉRI-BLATHY

206. — Dans cette machine qui a été construite pour alimenter les transformateurs secondaires de MM. Zipernowsky, Déri et Blathy, l'inducteur est mobile et l'induit est fixe.

Comme dans la dynamo Gramme à courants alternatifs, l'inducteur se compose de bobines disposées radialement autour de l'axe et enroulées sur des noyaux fixés à un moyeu en fonte qui est monté sur l'arbre.

Quant à l'induit, il comprend un tambour cylindrique formé de bandes en fer plat enroulées en cercle et maintenues par deux anneaux de bois, à l'intérieur duquel sont disposées les bobines induites. Celles-ci, en nombre égal aux bobines de l'inducteur, sont enroulées sur des âmes de fer dirigées suivant les génératrices du tambour et constituées par un fer plat forgé en forme de zigzag.

Ces machines exigent une excitatrice indépendante.

DYNAMO STANLEY DE LA COMPAGNIE WESTINGHOUSE

207. — La machine employée par la Compagnie américaine Westinghouse est due à un ingénieur de cette compagnie, M. Stanley ; elle est destinée, elle aussi, à alimenter des transformateurs secondaires.

L'inducteur est fixe ; il se compose de seize bobines disposées radialement et enroulées de telle façon que, sur la circonférence intérieure, leurs pôles soient alternativement de noms contraires.

L'induit comprend autant de bobines que l'inducteur, ainsi que nous l'avons expliqué § 165, en indiquant le principe des dynamos à courants alternatifs ; les enroulements de deux bobines voisines sont faits en sens inverse, de manière que les courants produits

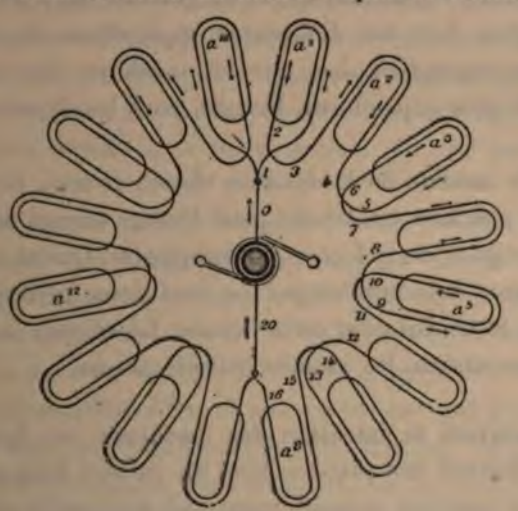


Fig. 141.

par chacune d'elles s'ajoutent l'un à l'autre (fig. 141). De plus, les bobines sont groupées en deux circuits parallèles, dont les extrémités communes sont reliées à deux bagues lisses sur lesquelles appuient les balais.

Le noyau de l'induit est formé de disques de tôle isolés et percés de trous pour l'aération ; les bobines, enroulées autour de lames en laiton, sont disposées sur la surface de ce noyau.

La machine est excitée par une dynamo indépendante à courant

continu ; tous les détails mécaniques de sa construction sont parfaitement étudiés.

208. — Nous ne pousserons pas plus loin les descriptions de machines électriques, bien qu'il en reste un nombre considérable dont nous n'avons pas parlé ; mais la plupart d'entre elles ne reçoivent que peu d'applications ; elles diffèrent d'ailleurs légèrement de celles que nous avons examinées, et leur étude nous entraînerait bien souvent à des répétitions inutiles.

Quant au choix d'une machine dans une installation électrique, il est impossible de l'indiquer *a priori*. Les dynamos ont toutes leurs avantages et leurs inconvénients, qui se font plus ou moins sentir suivant les circonstances, et en général elles peuvent toutes être employées dans les différentes applications de l'électricité. Nous devons cependant dire que les machines électriques, dont l'usage est le plus répandu en France, sont les dynamos Gramme et Edison.

Une fois le modèle de la dynamo choisi, il faut, bien entendu, prendre une machine construite pour l'usage auquel on la destine, lumière, transport de la force, galvanoplastie. Quant à ses dimensions, elles sont déterminées par les conditions mêmes de l'installation et par le travail dont on a besoin. La vitesse de la machine se règle aussi suivant les mêmes considérations.

209. Installation et entretien des machines. — Les machines électriques doivent être placées dans un endroit frais ou bien ventilé, de façon que leur échauffement soit diminué le plus possible, et au milieu d'une atmosphère sèche pour empêcher les pertes d'électricité. Elles ne doivent pas être installées dans des locaux où peuvent pénétrer, soit des substances explosives, soit des poussières inflammables. Il faut les fixer sur une base solide, afin d'éviter les trépidations qui pourraient résulter de la grande vitesse à laquelle elles sont soumises. Enfin, l'interposition d'une couche isolante de bois entre la machine et son massif de fondation est une bonne précaution. L'emplacement choisi doit permettre l'accès facile de tous les organes.

Quand on dispose d'un espace limité, comme à bord des navires, on ne peut employer les transmissions par courroies ; on doit donc atteler directement la dynamo sur son moteur. On a commencé par employer des moteurs à très grande vitesse comme ceux de Mégy ou de Brotherood. Mais maintenant on a créé des types de dynamos à faible vitesse en multipliant le nombre de leurs pôles ; le moteur et la dynamo sont montés dans le prolongement l'un de l'autre sur un même châssis. MM. Sautter et Lemonnier ont fait de nombreuses installations de ce genre.

L'emploi des dynamos à faible vitesse se répand de plus en plus aujourd'hui, et dans les stations centrales la tendance actuelle est de remplacer les groupes de machines par de puissantes dynamos. On cherche à réduire autant que possible le nombre de tours et à atteler directement les dynamos aux moteurs. Nous avons décrit précédemment la machine de M. Desroziers produisant 144 000 watts à 250 tours, celle de Siemens et Haske donnant 2 000 ampères et 140 volts à 80 tours. En parlant des stations centrales, nous verrons quelques applications intéressantes de ces puissantes machines.

Le sens du mouvement de rotation dépend, comme nous l'avons dit, du calage des balais qui ne doivent jamais être pris à rebrousse-poil. Quant à la vitesse, elle doit être maintenue uniforme : aussi est-il utile de vérifier de temps en temps le nombre de tours avec un vélocimètre. Il faut de plus placer sur le circuit électrique un ampèremètre et un voltmètre qui permettent de s'assurer du bon fonctionnement de l'installation. On peut le constater aussi en surveillant l'échauffement de la machine. Lorsque la température devient trop élevée, il faut ou diminuer la vitesse, ou introduire une résistance auxiliaire dans le circuit.

Les machines électriques doivent être conservées dans un très grand état de propreté. Sur les parties isolantes, les matières étrangères, les poussières métalliques, l'humidité même peuvent déterminer une dérivation et produire une déperdition du courant ; au contraire, dans les parties entre lesquelles doit exister un contact, comme les balais et le collecteur, par exemple, ces mêmes poussières pourraient nuire à la communication.

Le collecteur en particulier a besoin d'une bonne surveillance,

afin qu'il ne se produise pas de dérivation accidentelle entre ses différentes lames : on le nettoie en le frottant avec une brosse dure dans le sens de sa longueur.

Il faut encore s'assurer que les balais appuient suffisamment sur le collecteur et qu'il ne s'y produit pas d'étincelles ; on avance les balais au fur et à mesure de leur usure. Il est bon de les nettoyer de temps à autre avec de l'alcool ou du pétrole, mais on ne les remet en place que lorsqu'ils sont parfaitement secs. Il faut aussi serrer avec soin les contre-écrous des vis de réglage, afin que les porte-balais ne se desserrent pas par les vibrations de la machine.

On doit prendre les dispositions nécessaires pour qu'aucun objet métallique ne puisse mettre en contact les pôles opposés de la machine. Il est recommandé instamment de ne pas se servir pour le graissage de burettes en fer ; on peut employer le zinc.

CHAPITRE III

ACCUMULATEURS

NOTIONS GÉNÉRALES

210. Courants secondaires. — En décrivant les piles et les phénomènes de polarisation qui s'y produisent, nous avons parlé des courants *secondaires*. Nous avons dit qu'un voltamètre, soumis pendant un certain temps à l'action d'un courant électrique, pouvait, après la suppression de la source d'électricité, donner lieu à un courant de sens contraire au premier. Ce n'est pas seulement dans le voltamètre qu'on peut observer des actions semblables.

Quand on a fait passer un courant électrique entre deux plaques métalliques séparées par un corps humide, ces lames, après l'interruption du courant, donnent lieu à un phénomène analogue. Elles forment un élément secondaire et, en réunissant plusieurs plaques ainsi polarisées, on peut constituer une véritable pile.

Voici comment s'explique ce phénomène :

Pendant que le liquide est soumis à l'action de la pile primaire, il se décompose ; l'un des éléments qui le forment se porte au pôle positif, l'autre au pôle négatif. Si ces éléments ne se dégagent pas immédiatement dans l'air, ils sont sollicités tous les deux l'un vers l'autre par une force de polarisation qui tend à les rapprocher. Quand la force électromotrice de la source électrique est supérieure à la force contre-électromotrice de polarisation, l'électrolyse suit son cours. Mais si la source d'électricité vient à s'arrêter ou même à diminuer suffisamment de puissance, la force de polarisation exerce son action, et un courant se développe en sens

inverse du premier, jusqu'à ce que les produits de la décomposition accumulés sur les électrodes se soient recombinés et aient complètement disparu.

Voici un fait constaté en électro-métallurgie qui confirme cette théorie. Dans des bains de sulfate de zinc soumis à l'action d'une machine Gramme, étaient disposées en tension des électrodes positives en plomb et négatives en zinc. Or, il est arrivé souvent que, par suite d'un simple ralentissement du moteur, les courants secondaires devenaient prépondérants au point de faire tourner la machine en sens contraire.

Ces effets de polarisation sont plus ou moins énergiques selon la composition du liquide et des électrodes. En outre, la charge d'électricité accumulée ainsi peut se conserver plus ou moins longtemps suivant la nature des métaux et leur état physique. Dans quelques cas, cette action secondaire a très peu de durée.

Les accumulateurs ont pour but d'utiliser ces courants secondaires. Ils servent à emmagasiner par la polarisation une grande quantité d'électricité, qui doit être ensuite restituée dans un temps plus ou moins long et à différents intervalles.

La période pendant laquelle l'accumulateur est mis en rapport avec la source primaire d'électricité constitue la période de *charge*. La *décharge* a lieu au contraire lorsqu'on utilise l'énergie électrique emmagasinée dans l'élément secondaire.

Les conditions qu'un accumulateur doit remplir pour être industriel sont les suivantes :

1° Il faut qu'il puisse emmagasiner la plus grande quantité d'électricité sous le plus petit volume et surtout avec le moindre poids, ou, en d'autres termes, qu'il ait une grande capacité électrique;

2° La charge électrique doit se conserver longtemps sans perte;

3° Il faut que l'accumulateur ait un bon rendement, c'est-à-dire qu'il restitue la plus grande partie du travail dépensé pour le charger;

4° Comme les piles primaires, les accumulateurs doivent fournir un courant constant, sans intermittence, et il faut qu'on puisse régler à volonté la décharge suivant le genre de travail que l'on a en vue.

ACCUMULATEUR PLANTÉ

211. — C'est M. Planté qui a résolu le premier ce problème, en 1859 ; il a reconnu que le plomb remplissait suffisamment les conditions du programme. Sa pile secondaire est formée de deux lames de plomb baignant dans de l'eau acidulée au dixième par de l'acide sulfurique. Ces deux lames (fig. 142) sont enroulées concentriquement en spirale et maintenues par deux bandes de caoutchouc, qui servent aussi à empêcher tout contact entre elles. Le tout est placé dans un vase cylindrique en verre fermé par

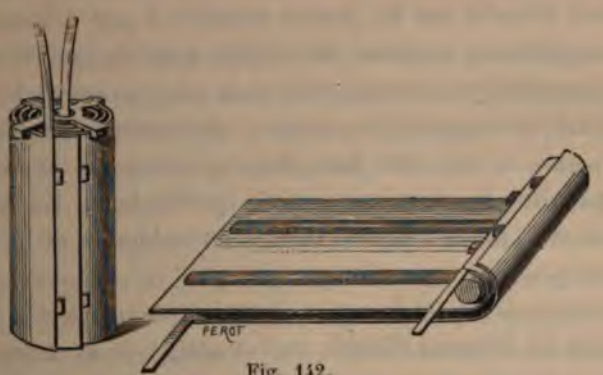


Fig. 142.

un bouchon, dans lequel est ménagé un trou pour le dégagement des gaz et l'emplissage de l'appareil. Il y a enfin un couvercle en ébonite sur lequel sont deux bornes métalliques reliées aux deux plaques de plomb.

Charge et décharge de la pile. — Pour la charge de cet élément, il faut 2 couples Bunsen ou 3 Daniell. Pendant cette opération, l'eau est décomposée; l'oxygène se porte sur la lame positive, c'est-à-dire sur celle qui communique avec le pôle positif de la pile primaire, et cette lame se revêt d'une couche brune de bioxyde de plomb PbO^2. L'hydrogène se porte sur la lame négative.

Quand la charge a atteint son maximum, ce qu'on remarque au dégagement d'oxygène qui se produit sur l'électrode positive, on

interrompt l'action de la source électrique qui, à partir de ce moment, se dépenserait en pure perte.

Pendant la décharge de la pile secondaire, c'est-à-dire lorsqu'on vient à fermer le circuit de cette pile sur lui-même, le peroxyde de plomb formé sur la plaque positive se réduit à l'état d'oxyde et s'unit à l'acide sulfurique contenu dans la liqueur pour former du sulfate de plomb, tandis que l'oxygène ainsi dégagé se porte sur la lame négative, l'oxyde et donne finalement du sulfate de plomb.

Le courant secondaire ne cesse que lorsque tout le peroxyde de plomb est réduit. A ce moment, les deux éléments sont recouverts de sulfate de plomb.

En réalité, on n'obtient dans cette première décharge qu'un courant d'une très faible durée, parce que la couche de peroxyde de plomb formée sur la plaque positive a peu d'épaisseur et se trouve rapidement épuisée. On charge donc de nouveau l'élément en le remettant en circuit avec une pile primaire; le sulfate de plomb est décomposé, les mêmes phénomènes se reproduisent, mais l'action se fait cette fois plus rapidement et pénètre dans la lame positive à une plus grande profondeur. La quantité de peroxyde de plomb formée est plus considérable et le courant de décharge peut durer plus longtemps.

Formation de la pile Planté. — Dans la pratique, avant d'employer utilement un élément Planté, on est obligé de le charger et de le décharger ainsi un grand nombre de fois. Cette opération, qu'on appelle la *formation*, exige plusieurs mois : c'est là le principal inconvénient de l'accumulateur. La formation peut d'ailleurs être faite autrement que par des charges et des décharges alternatives; on opère plus rapidement au moyen de renversements du courant primaire; dans ce cas, on doit avoir soin, avant de changer le sens de ce courant, de décharger les éléments jusqu'à ce qu'ils ne donnent plus qu'un faible courant en court circuit.

Mais, une fois l'accumulateur formé, il faut se garder de changer le sens du courant; car on consommerait inutilement l'énergie de la pile primaire, pour réduire simplement l'oxyde de plomb qui pourrait rester sur une électrode, et pour oxyder l'autre plaque.

Afin d'activer la formation, M. Planté a proposé d'attaquer préalablement les plaques en les laissant séjourner de 24 à 48 heures

dans l'acide azotique étendu. Ce procédé, qui est adopté dans la pratique, augmente la porosité du plomb et facilite l'action du courant de charge. Dans ces conditions, la formation peut être faite en une semaine.

Le couple secondaire, une fois chargé et abandonné à lui-même, reste chargé durant plusieurs jours. Cependant il perd par le repos une certaine quantité d'électricité, et l'on a plutôt intérêt à le décharger immédiatement.

Les éléments d'une pile secondaire se groupent entre eux suivant les mêmes règles que les couples primaires; on les réunit en tension et en quantité, et, quand on en connaît la force électromotrice et la résistance, on peut résoudre les mêmes problèmes que pour les piles primaires, comme nous le verrons plus loin.

L'intensité fournie par la pile secondaire décroît lentement si le circuit offre une grande résistance; l'électricité s'écoule en grande quantité dans le cas contraire. La durée de la décharge dépend donc de la résistance extérieure.

Quand la pile a fourni toute la quantité d'électricité qu'elle contient, il est à remarquer que, si on la laisse reposer un peu, on obtient une seconde décharge, moins forte que la première, il est vrai, mais encore très sensible, et ainsi de suite pendant une période plus ou moins longue. MM. Gladstone et Tribe expliquent ce phénomène par la présence sur l'électrode négative de parcelles de peroxyde qui proviendraient d'une suroxydation électrolytique partielle du sulfate pendant la décharge.

C'est aussi pour cette raison que la décharge est plus complète quand on l'effectue en plusieurs fois, que lorsqu'elle est obtenue en une seule.

La force électromotrice au début, c'est-à-dire quelques moments après la formation de l'élément, est de 2,53 volts, environ une fois et demie celle du couple Bunsen. Deux minutes après, on a 2,10 volts, et pendant les deux tiers de la décharge on obtient 2,02 volts.

La résistance est très faible à cause de la disposition concentrique des deux électrodes qui se trouvent très rapprochées l'une de l'autre. Elle varie avec l'état de formation des couples et l'état

physique des lames de plomb. La résistance intérieure d'un élément ayant 50 décimètres carrés de surface totale, avec des lames éloignées l'une de l'autre de 5 millimètres, est de 0,04 à 0,06 ohm.

La quantité d'électricité emmagasinée est nécessairement proportionnelle à la surface du plomb, et, grâce à la forme en spirale, cette surface peut être fort grande sous un volume assez restreint. Un couple bien formé, qui contient 1 500 grammes de plomb, dépose, jusqu'à ce qu'il soit complètement épuisé, 18 grammes de cuivre dans un voltamètre à sulfate de cuivre. La quantité d'électricité fournie est donc de 55 000 coulombs, ce qui représente 36 700 coulombs par kilogramme de plomb. Dans des expériences faites en 1883, M. Planté a obtenu un dépôt de cuivre de 19 grammes par kilogramme de plomb. On peut d'ailleurs utiliser environ les $\frac{2}{3}$ de la décharge sans que la force électromotrice descende au-dessous de 2 volts, soit 24 400 coulombs. C'est donc un travail de 4 900 kilogrammètres qui est accumulé dans un kilogramme de plomb.

La pile secondaire ne crée pas de l'électricité ; elle ne fait que transformer celle qu'on y dépose, et, comme toute transformation entraîne nécessairement une perte, on ne retrouve pas dans la seconde opération toute l'électricité dépensée dans la première. M. Planté, après des expériences précises, a reconnu qu'il perdait environ un dixième de la quantité d'électricité fournie pendant la charge.

212. — Afin d'obtenir des effets suffisamment énergiques, sans avoir une pile trop encombrante, M. Planté a imaginé une disposition représentée figure 143, qui permet de réunir dans un petit espace un grand nombre de couples et de les grouper à volonté en tension ou en quantité.

Un commutateur à bascule CC′, placé à la partie supérieure, sert à accoupler les éléments. Dans une première position, toutes les lames paires communiquent entre elles ; de même, pour les lames impaires : les couples sont alors associés en quantité. En tournant le commutateur de 90°, chaque lame paire d'un élément communique avec la lame impaire du couple suivant : les éléments sont alors réunis en tension.

C'est dans la première position qu'on charge la pile, et deux éléments Bunsen y suffisent. Si l'on décharge en laissant le commutateur dans cette même position, on obtient pendant quelques instants un courant d'une très grande intensité capable de produire des effets calorifiques fort énergiques. En déchargeant au contraire la pile en tension, on obtient un courant d'une force électromotrice égale à 30 Bunsen pendant quelques secondes. En général, la durée de la décharge secondaire est une fraction très petite de celle de la charge par la pile primaire.

Les piles de M. Planté ont reçu quelques applications indus-

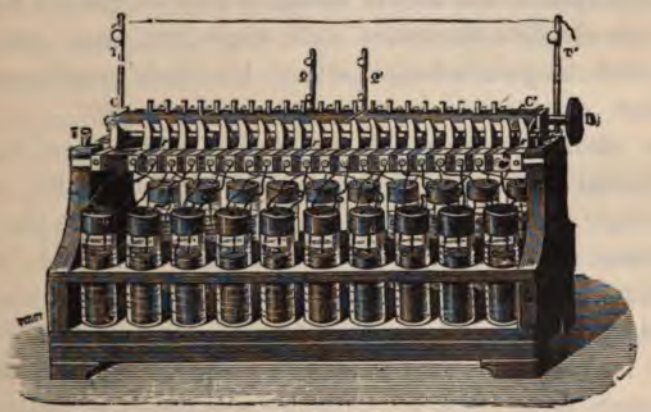


Fig. 143.

trielles, telles que l'inflammation des mines ; elles rendent aussi des services en chirurgie. Ce système permet de réaliser sous un petit volume des sources d'électricité très puissantes. M. Planté a réuni 800 éléments secondaires qui équivalent à peu près à 1200 couples Bunsen de grande surface, et il a pu obtenir des effets identiques à ceux que détermine la décharge d'électricité statique ; il a produit ainsi des étincelles de $0^m,05$ de longueur.

Les piles secondaires de M. Planté donnent, comme nous l'avons vu, des résultats remarquables ; mais elles ne sont pas assez industrielles. Leur formation est très longue ; car elle s'obtient par une série de charges et de décharges successives, jusqu'à ce que l'état moléculaire du plomb soit modifié sur une profondeur suffisante. En outre, la disposition des piles ne leur permet pas

d'emmagasiner une assez grande quantité d'électricité. Nous allons indiquer les principales solutions proposées pour remédier à ces inconvénients.

213. Accumulateur Legay. — Cet accumulateur ne diffère de l'élément Planté que par la forme. Les électrodes en plomb sont contenues dans un vase cylindrique en verre de 20^{cm} de diamètre et de 40^{cm} de hauteur ; ce vase est hermétiquement fermé par un couvercle en verre portant une rondelle de caoutchouc faisant joint; à ce couvercle sont suspendues les électrodes au moyen de clavettes traversant des œillets ménagés dans les queues venues de fonte avec lesdites électrodes. Cette disposition assure un montage et un démontage très faciles, et évite les courts circuits par le fond du vase.

Les électrodes sont des manchons cylindriques en plomb s'emboîtant les uns dans les autres et à 5^{mm} d'intervalle, cet intervalle étant maintenu par des baguettes en ébonite. Chacun des manchons est formé d'une âme cylindrique pourvue à l'extérieur et à l'intérieur, suivant les génératrices du cylindre, d'un nombre considérable d'ailettes ayant 1,5^{mm} d'épaisseur et 7^{mm} de largeur ; les manchons sont fondus en plaques avec leurs ailettes et les queues destinées à les soutenir, puis roulés et soudés.

Cette disposition présente les qualités suivantes : grande solidité, bon isolement, étanchéité parfaite, débit assez grand par rapport à la capacité, enfin longue durée. Mais il faut reconnaître que ces avantages n'ont été obtenus qu'aux dépens de la capacité. Dans le type de 32 kilogrammes, la capacité n'est que de 70 ampères-heure.

Avec un accumulateur complètement formé, on peut compter sur 5 ampères-heure par kilogramme ; une telle formation ne s'obtient toutefois qu'avec le temps : c'est seulement au bout de trois ans que le type de 32 kilogrammes peut atteindre une capacité de 150 ampères-heure.

ACCUMULATEURS AU PLOMB DU SYSTÈME FAURE

214. Accumulateur Faure. — Au lieu de procéder comme M. Planté pour opérer la formation de l'accumulateur, c'est-à-dire de déposer électriquement l'oxyde de plomb sur les plaques par des charges et des décharges successives, M. Faure a pensé, en 1880, à fixer préalablement cet oxyde par des procédés mécaniques. Cette idée, qui a eu depuis lors de nombreux imitateurs, réduit considérablement la durée de la formation. Par contre, les plaques ainsi construites sont moins solides que les autres ; l'oxyde de plomb se détache assez facilement et vient tomber au fond du vase, ce qui peut produire des courts circuits entre les plaques et diminue en tout cas la capacité de l'élément.

L'accumulateur imaginé par M. Faure se composait de deux lames de plomb recouvertes d'une couche de minium mis en pâte avec de l'eau, entourées d'une feuille de papier parcheminé et renfermées dans un fourreau de feutre léger. Les deux plaques ainsi formées étaient enroulées concentriquement et placées dans un vase rempli d'eau acidulée.

Cet appareil présentait deux défauts sérieux : le feutre se décomposait et le minium n'adhérait pas assez à la plaque de plomb, de telle sorte que l'élément se trouvait rapidement hors de service. Aussi a-t-il été complètement abandonné.

215. Accumulateur Faure Volckmar ou E. P. S. — En 1882, le modèle de M. Faure fut modifié par M. Volckmar, et les plaques furent formées d'un grillage en plomb, dans les alvéoles duquel était la pâte d'oxyde. C'est sur ce type que la Compagnie anglaise « Electrical Power Storage Company » a construit depuis cette époque ses éléments, désignés communément sous le nom d'accumulateurs E. P. S.

Mais la pâte ainsi introduite se dilate pendant la charge qui la transforme en peroxyde, et il en résulte des gondolements qui peuvent produire des contacts entre deux plaques voisines. De plus,

les pastilles qui remplissent chaque alvéole se détachent sous l'action mécanique de cette expansion.

Afin d'éviter les contacts produits par le gondolement, les plaques étaient séparées les unes des autres par de petits tampons en caoutchouc fixés en différents points de leur surface. En outre, elles reposaient sur deux pièces de bois de teck, laissant au-dessous d'elles un espace libre où tombaient les pastilles ; les courts circuits étaient ainsi évités.

Dans la dernière disposition (fig. 144), la distance entre les

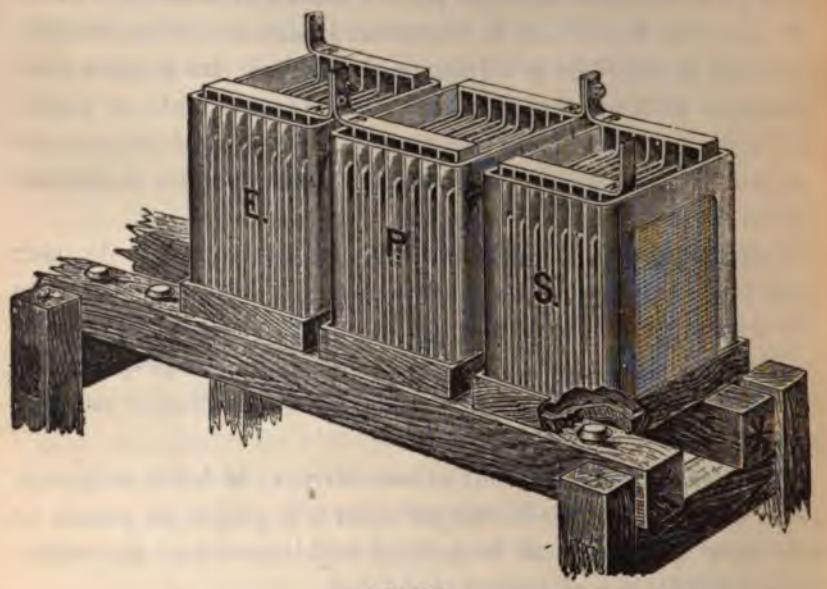


Fig. 144.

plaques a été légèrement augmentée, et les tampons de caoutchouc ont été remplacés par des anneaux en ébonite qui entourent les plaques positives.

Les plaques négatives sont reliées par cinq traverses en plomb qui les maintiennent dans une position invariable. Deux de ces traverses, soudées à la partie inférieure, reposent sur des tasseaux de bois dans le vase en verre ; deux autres sont à mi-hauteur des plaques et supportent des petits blocs en ébonite sur lesquels s'appuient des saillies présentées par les plaques positives ; c'est là le mode de suspension de ces dernières qui ne des-

cendent pas jusqu'au fond du vase. Enfin, la cinquième traverse est à la partie supérieure et sert de conducteur au courant.

La carcasse des plaques est constituée par un alliage de plomb et d'antimoine qui la rend inoxydable et augmente sa solidité. Les plaques comprennent en poids deux tiers de carcasse et un tiers de pâte d'oxyde.

Les plaques sont placées, en plus ou moins grand nombre suivant les dimensions de l'élément, dans une caisse en verre renfermant de l'eau acidulée au dixième par l'acide sulfurique. Elles sont alternativement positives et négatives.

Les deux tiers environ du poids total sont représentés par les plaques, l'autre tiers par le liquide et la caisse. Les éléments sont établis sur deux types, suivant qu'ils doivent fournir une décharge rapide ou lente. Pour les premiers, désignés sous le type S, la capacité est de 12 ampères-heure par kilogramme de plaques, et de 8 ampères-heure par kilogramme de poids total ; pour les seconds représentés par la lettre L, elle est moins élevée et est respectivement de 9 et 6 ampères-heure.

216. — Au commencement de l'année 1888, MM. Philippart ont pris la représentation en France des brevets Faure-Volckmar, et adopté un perfectionnement proposé par M. Sellon, dans le but de supprimer les barres collectrices auxquelles sont reliées toutes les plaques de même nom de chaque élément, et sur lesquelles on établit les connexions reliant les plaques de noms contraires de deux éléments voisins réunis en tension.

A cet effet, les plaques sont fabriquées par paire ; chaque paire comprend une positive et une négative, réunies par un pont en alliage de plomb et d'antimoine (fig. 145) et appartenant respectivement à deux éléments consécutifs.

Les éléments qui composent une batterie, sont alors placés bout à bout ; les plaques négatives du premier élément sont reliées individuellement aux plaques positives du second, les négatives du second aux positives du troisième et ainsi de suite. Les positives du premier élément et les négatives du dernier sont seules réunies par deux barres qui constituent les pôles de la batterie.

Cette disposition a l'avantage de supprimer les soudures des

connexions et de faciliter le montage des batteries ; mais elle exige un emplacement d'une très grande longueur et entraîne le renouvellement des négatifs accolés à des positifs usés. Elle n'est applicable que dans les grandes installations où les accumulateurs sont montés à poste fixe et en tension.

Fig. 145.

217. Accumulateur Julien. — L'accumulateur Julien ne diffère guère de l'élément E.P.S. que nous venons d'étudier. La seule modification consiste dans la fabrication de la carcasse des plaques qui est formée d'une matière inoxydable, comprenant 95 p. 100 de plomb, 3,5 d'antimoine et 1,5 de mercure.

L'accumulateur Julien est principalement appliqué à la traction des tramways où il donne de bons résultats.

Le type ordinaire se compose de 6 plaques positives et 6 plaques négatives ; ces plaques sont carrées et ont chacune 17,3 *cm* de côté. Elles pèsent ensemble 10,9 *kg*. Le poids total est de 13,7 *kg*.

La capacité de cet élément est de 10 ampères-heure par kilogramme de plomb, ou 8 ampères-heure par kilogramme de poids total.

Le débit normal varie de 1 à 1,5 ampère par kilogramme de plomb ; mais il peut être poussé assez facilement jusqu'à 2,5 ampères.

218. Accumulateur Gadot. — Lorsqu'on coule les plaques d'une seule pièce, comme dans les appareils que nous venons de voir, on est obligé de donner de la dépouille au quadrillage pour pouvoir effectuer le démoulage. Il en résulte que chaque alvéole se

présente sous forme d'un trou doublement tronconique, plus étroit vers le milieu de la plaque que sur ses deux faces. Dans ces conditions, le foisonnement de l'oxyde a pour effet de faire fendre la pastille en deux vers le milieu, là où elle offre le moins de résistance : l'une des moitiés tombe d'un côté et l'autre moitié du côté opposé, le talus ménagé par la dépouille favorisant cette chute, surtout lorsque la plaque reçoit quelques secousses mécaniques.

M. Gadot a supprimé cet inconvénient en constituant les plaques en deux parties rivées au plomb ; les parties les plus larges des alvéoles sont au milieu de la plaque (fig. 146) et, loin d'être projetées à l'extérieur, les pastilles se trouvent comprimées et maintenues par le foisonnement. Comme dans l'accumulateur Julien, le quadrillage est fait en une matière inoxydable.

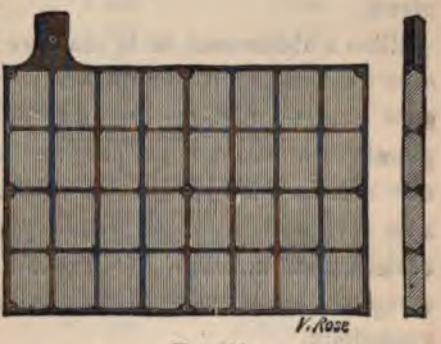


Fig. 146.

Les plaques sont suspendues et soudées sur une longue tige en plomb qui s'oppose au grimpement de l'eau acidulée et l'empêche d'atteindre les bornes en laiton.

D'après M. Gadot, la capacité des accumulateurs ainsi construits varie entre 8 et 10 ampères-heure par kilogramme de plaques, c'est-à-dire entre 5 et 6,5 ampères-heure par kilogramme de poids total.

Le liquide est constitué par 8 à 9 volumes d'eau et 1 volume d'acide sulfurique à 66°.

M. Gadot a pu plus récemment augmenter dans de très fortes proportions la grandeur des alvéoles, sans compromettre pour cela la solidité des plaques. Cette modification lui a permis de diminuer le poids du plomb inactif et d'avoir des plaques contenant 50 p. 100 de pâte d'oxyde. La capacité de l'élément se trouve ainsi portée de 10 à 12 ampères-heure par kilogramme de plaques. En même temps, la surface d'accès du liquide est augmentée, ce qui réduit la résistance de l'élément et accroît son débit.

Dans ces conditions on peut compter sur 10 ampères-heure par kilogramme de plaques et sur 6,6 ampères-heure par kilogramme d'accumulateur.

219. Accumulateur Laurent-Cély. — Les plaques des accumulateurs Laurent-Cély, construits par la *Société pour le travail électrique des métaux*, sont formées de pastilles de plomb spongieux pour les plaques négatives et de peroxyde de plomb pour les plaques positives, reliées par un quadrillage en plomb antimonieux.

Elles s'obtiennent de la manière suivante : les pastilles, composées d'un mélange de chlorure de plomb et de chlorure de zinc, sont coulées dans un moule dans lequel on verse ensuite le plomb antimonieux. La plaque une fois formée est placée dans une solution de chlorure de zinc très étendue avec une lame de zinc à laquelle elle est réunie par un conducteur extérieur. On obtient ainsi un élément de pile : le chlorure des pastilles se décompose, le chlore se porte sur le zinc et le plomb reste à l'état spongieux.

Les plaques sont moulées en plus ou moins grand nombre, suivant les modèles, dans des châssis spéciaux en matière isolante qui les éloignent des bords du vase et les espacent entre elles.

Les bacs sont en grès, en verre ou en bois doublé de plomb.

La capacité de l'accumulateur Laurent-Cély varie, suivant les dimensions des plaques, de 9 à 10 ampères-heure par kilogramme de plaques. Le régime normal est de 0,5 ampère pendant la charge et de 1 ampère pendant la décharge par kilogramme de plaques; le régime maximum est de 2 ampères pendant la charge et de 3 ampères pendant la décharge.

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES ACCUMULATEURS AU PLOMB

220. Capacité des accumulateurs au plomb. — La force électromotrice moyenne sur laquelle on peut compter pendant la décharge des accumulateurs au plomb, est de 2 volts.

En multipliant par cette force électromotrice les nombres d'ampères-heure que nous avons indiqués pour les différents éléments étudiés ci-dessus, nous arrivons aux résultats suivants, exprimés en chiffres ronds, pour les nombres de kilogrammètres emmagasinés dans 1 *kg* de plaque et dans 1 *kg* de poids total (liquide et récipient compris).

Éléments.	Kilogrammètres par kilogramme de plaques.	Kilogrammètres par kilogramme de poids total.
Legay	3 300	»
E. P. S. type S	8 600	5 700
E. P. S. type L	6 500	4 300
E. P. S. modèle Philippart	7 200	4 700
Julien	7 200	5 700
Gadot (ancien modèle)	5 700	3 800
Gadot (nouveau modèle)	7 200	4 800
Laurent-Cély	6 600	»

Ce qui revient à dire que, pour emmagasiner 1 cheval-heure, il faut :

Éléments.	Kilogrammes de plaques.	Kilogrammes de poids total.
Legay	81,8	»
E. P. S. type S	31,3	47,3
E. P. S. type L	41,5	62,7
E. P. S. modèle Philippart	37,5	56,3
Julien	37,5	47,3
Gadot (ancien modèle)	47,3	71,0
Gadot (nouveau modèle)	37,5	56,2
Laurent-Cély	40,9	»

221. Puissance des accumulateurs au plomb. — En outre de la capacité, il y a un autre facteur dont il faut tenir compte, c'est celui de la puissance de l'accumulateur, c'est-à-dire de la quantité d'énergie qu'il peut fournir par seconde, ou, ce qui revient au même, du nombre de kilogrammes nécessaire pour développer une puissance de 1 cheval.

Dans les installations d'éclairage, la question de puissance n'est pas, il est vrai, très importante, car il n'y a pas un grand inconvénient à avoir quelques kilogrammes d'éléments de plus ou de moins ; en outre, la batterie est établie pour développer un travail déterminé par seconde, et il est rare qu'elle ait à fournir à un moment donné

un travail beaucoup plus considérable. Il n'en est pas du tout de même dans la traction des tramways où l'on a tout intérêt à réduire le poids mort et où, lors du démarrage et sur les rampes un peu fortes, on a besoin d'une puissance bien supérieure à celle dont on doit disposer ordinairement. Il y a là un coup de collier que les accumulateurs doivent fournir sans inconvénient pour leur fonctionnement normal, et c'est une des conditions principales à remplir dans ce genre d'applications.

En général, on admet que le débit des accumulateurs au plomb ne doit pas dépasser 1 ampère par kilogramme de plaques dans une installation d'éclairage. Pour la traction des tramways, en vue de laquelle les éléments E. P. S. type S, et ceux de Julien ont été spécialement étudiés, on arrive, par kilogramme de plaques, à un débit de 2 ampères avec l'élément E. P. S, et de 1,5 ampère avec l'élément Julien, ce qui conduit, pour une puissance de 1 cheval, à des poids de :

184 *kg* de plaques et 276 *kg* d'accumulateur avec l'élément E. P. S. type S,

235 *kg* de plaques et 300 *kg* d'accumulateur avec l'élément Julien.

Dans les cas particuliers dont nous avons parlé plus haut, le débit peut être momentanément porté à 5 et 6 ampères par kilogramme de plaques.

222. Rendement. — Le rendement en watts des accumulateurs dépend de nombreuses circonstances parmi lesquelles nous citerons en première ligne la rapidité et la continuité de la décharge. Il est donc difficile de donner un chiffre précis à ce sujet, mais on peut admettre qu'il faut compter sur une perte de 35 à 40 p. 100, c'est-à-dire que l'accumulateur rend de 60 à 65 p. 100 de l'énergie qu'on lui fournit.

ACCUMULATEURS AU CUIVRE

223. — Accumulateur Commelin, Desmazures et Bailhache. — Ainsi que nous l'avons dit plus haut, tous les métaux sont susceptibles de se polariser sous l'action d'un courant, et de donner par suite

un courant secondaire de décharge. Mais le plomb seul avait fourni des résultats satisfaisants, lorsque, au mois de septembre 1887, les expériences du canot électrique de la marine française, au Havre, attirèrent l'attention générale sur l'élément Commelin, Desmazures et Bailhache.

Cet élément ne contient pas de plomb ; il se compose en principe de deux électrodes, l'une négative en zinc, l'autre positive en cuivre poreux, plongées dans une solution de zincate de potasse. Sous l'action du courant de charge, le zincate se décompose, le zinc se dépose sur l'électrode négative, l'oxygène se porte sur le cuivre qu'il oxyde, et la potasse reste dissoute dans la liqueur. On se trouve avoir alors une véritable pile à zinc, oxyde de cuivre et potasse, telle qu'elle a été proposée, il y a quelques années, par MM. de Lalande et Chaperon (§ 144), et c'est le courant fourni par cette pile qui est utilisé pendant la décharge de l'accumulateur.

Cet appareil, dont il avait été beaucoup parlé lors de ses premiers essais, n'a pas été appliqué dans l'industrie. Nous ne le citons qu'à titre historique. D'après les expériences faites en 1888, il fallait 39 *kg* d'accumulateur au cuivre par cheval-heure, et 174 *kg* pour une puissance de 1 cheval.

CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'EMPLOI DES ACCUMULATEURS

224. Conditions de la charge et de la décharge. — Pour charger les accumulateurs, on peut se servir d'une source électrique quelconque. Pour les éléments de petite dimension, comme ceux de Planté, les piles primaires suffisent, ainsi que nous l'avons vu. Mais dans les applications industrielles, il faut faire usage des machines magnéto ou dynamo-électriques. Les magnétos ont l'avantage de donner un courant de sens invariable, et avec elles on n'est pas exposé à voir les pôles intervertis pendant la charge ; mais on ne peut guère les employer que dans les applications de peu d'importance.

Les machines dynamos conviennent seules dans les installations véritablement industrielles. Il faut éviter autant que possible de

placer les inducteurs de la machine dans le circuit principal, parce qu'il peut se produire des interversions de pôles. Il vaut mieux que les électro-aimants soient excités en dérivation ou par une machine séparée. Mais avec ces deux dispositions, il faut intercaler une résistance variable pour régler le courant excitateur et, par suite, le courant principal. Il convient, pendant la charge, d'accoupler les éléments de façon que leur résistance totale soit environ le triple de celle de la machine.

La force électromotrice des accumulateurs étant nulle au début et augmentant au fur et à mesure de leur formation, la force électromotrice de la machine pourrait d'abord être trop grande et l'intensité dépasserait les limites voulues. Pour y obvier, on interpose dans le circuit une résistance qu'on fait varier suivant les besoins. Les intensités sont indiquées par des ampèremètres intercalés dans le circuit. Des voltmètres placés en dérivation donnent les forces électromotrices.

Pour reconnaître facilement et sans appareils spéciaux le sens du courant pendant la charge, c'est-à-dire pour s'assurer que l'opération marche régulièrement, on peut employer le procédé suivant indiqué par M. H. Fontaine. On fixe l'une des extrémités d'un fil de cuivre à un accumulateur placé au milieu de la batterie. A l'autre extrémité du fil on adapte une petite lame en plomb assez mince pour pouvoir être introduite dans un accumulateur. On plonge cette lame, pendant la charge, tantôt dans le premier, tantôt dans le dernier élément. D'un côté, le plomb brunit en se peroxydant; de l'autre côté, il prend l'aspect métallique; ce résultat s'obtient en moins de 15 secondes. Le courant va de l'élément où le plomb se dépose à l'élément où le plomb se peroxyde.

225. — Ainsi que nous l'avons dit plus haut, la décharge ne doit pas être trop rapide, car le travail électrique total disponible va en diminuant à mesure qu'on demande par unité de temps un travail plus considérable. La valeur limite du courant de décharge a été donnée par l'expérience ; elle dépend naturellement de la surface des plaques et, si nous l'avons exprimée en fonction du poids, c'est que les plaques ont, en général, une épaisseur constante et que leur surface est par suite à peu près proportionnelle à leur poids.

Il en est de même pour le courant de charge qui ne doit pas dépasser la moitié de l'intensité débitée pendant la décharge.

Un dégagement de gaz dans l'appareil indique que la charge est terminée, mais ce renseignement n'est pas très précis. Il vaut mieux, comme l'a proposé M. Preece, mesurer de temps en temps la force électromotrice; elle augmente régulièrement pendant la charge et ne devient constante que lorsque l'opération est terminée.

Il existe un autre procédé, imaginé par MM. Crova et Garbe et basé sur le raisonnement suivant. On peut admettre que les réactions chimiques, qui se produisent pendant la charge sur les deux plaques d'un accumulateur, se bornent à transformer la couche de sulfate de plomb de la lame positive en bioxyde de plomb, et celle de la lame négative en plomb métallique. On a ainsi sur les deux électrodes un dégagement d'acide sulfurique qui reste dans le liquide. Comme on connaît, d'ailleurs, le poids de sulfate de plomb décomposé par un coulomb, on peut, par un calcul fort simple, se rendre compte de la quantité d'électricité qui, à un moment donné de la charge, a traversé l'accumulateur, et cela d'après le poids d'acide sulfurique contenu à cet instant dans l'eau acidulée.

Prenons comme exemple un accumulateur Gadot, renfermant 20 *kg* de plomb et ayant une capacité de 6 700 *kgm* ou 33 500 coulombs par kilogramme de plomb. L'équivalent électrochimique du plomb étant 1,0747 *mg* et celui de l'acide sulfurique 0,5088 *mg*, chaque coulomb emmagasiné agira pour chaque plaque sur 1,0747 *mg* de plomb et dégagera dans le liquide 1,0176 *mg* d'acide. Les 20 × 33 500 ou 670 000 coulombs qui, une fois emmagasinés, représentent la charge complète de l'élément, dégageront donc un poids d'acide sulfurique égal à 1,0176 × 670 000 *mg* ou 681^{gr}, 792.

Il suffit donc, au moyen d'expériences préliminaires, de dresser une table qui sert à déduire la charge de la densité du liquide, et avec un simple densimètre on peut reconnaître dans la pratique le point où en sont les accumulateurs. Comme densimètre, on peut prendre soit le type ordinaire à ampoule aplatie, soit l'appareil de Hick qui se compose d'un tube de verre percé de petits trous et contenant quatre ampoules différemment colorées et lestées, de

manière à flotter pour des densités respectives de 1,15 — 1,17 — 1,19 et 1,20 ; soit l'hydromètre de Holden comprenant un flotteur en ébonite terminé par une tige en même matière dont l'extrémité supérieure se déplace devant une échelle fixe ; soit enfin l'appareil de M. Legay composé d'une petite ampoule de verre terminée par une longue tige de verre se déplaçant aussi devant une échelle fixe.

Mais ce procédé a le défaut de s'appuyer sur la connaissance de la capacité qui est encore fort incertaine, et de donner par suite des indications quelquefois un peu inexactes.

226. Conjoncteur automatique. — Le moyen le plus pratique est d'avoir recours à un appareil automatique qui établit et coupe la communication avec la source de charge, suivant que la force électromotrice de celle-ci est supérieure ou inférieure à celle de la batterie secondaire. Il existe plusieurs appareils de ce genre ; on peut se servir avantageusement de celui de M. Simmen, avec lequel M. Hospitalier a obtenu de bons résultats.

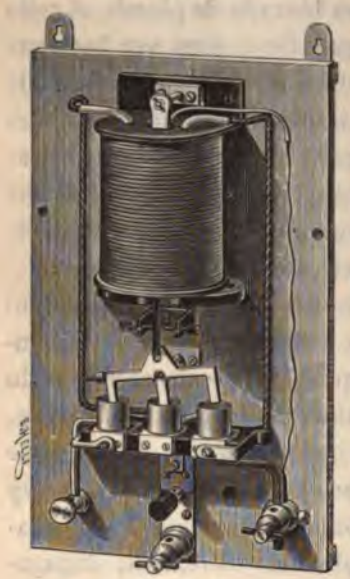


Fig. 147.

Le conjoncteur automatique se compose en principe d'un aimant (fig. 147) et d'une tige verticale en fer doux entourée d'une bobine fixe formée de deux fils, l'un gros et court, l'autre long et fin. Cette tige de fer doux s'aimante sous l'action des courants qui traversent les deux fils de la bobine : elle constitue un véritable relais polarisé et peut prendre deux positions différentes, en entraînant dans son mouvement un basculeur en cuivre qui, suivant sa position, établit une communication électrique entre le godet en fer du milieu rempli de mercure et l'un ou l'autre des deux autres godets latéraux renfermant également du mercure.

Le fil fin de la bobine est monté en circuit avec les accumulateurs et la machine de charge. Lorsque celle-ci est en marche et

produit une force électromotrice supérieure à celle de la batterie, le courant qui traverse ce fil fin agit sur le relais polarisé, de telle sorte que le basculeur établit le contact entre le godet du milieu et le godet de droite. A ce moment, le gros fil se trouve placé en dérivation sur les extrémités du fil fin et, comme il a une très faible résistance, il laisse passer la presque totalité du courant de charge.

Lorsque la force électromotrice de la batterie devient, au contraire, supérieure à celle de la machine, le courant change de sens dans la bobine ; le relais se trouve attiré par le pôle sud de l'aimant, le basculeur rompt le circuit du gros fil et établit une communication entre le godet du milieu et le godet de gauche, en fermant le circuit des accumulateurs sur une sonnerie dont le fonctionnement annonce la fin de la charge.

Le système fonctionne donc sans aucun réglage, par le fait seul de la supériorité ou de l'infériorité des forces électromotrices inverses de la machine et des accumulateurs. L'appareil se dispose très simplement en circuit en reliant la première borne au positif des accumulateurs, la deuxième au positif de la machine, la troisième à la sonnerie, et en établissant une communication directe entre les bornes négatives des accumulateurs et de la machine et la seconde borne de la sonnerie.

La résistance du fil fin de la bobine varie de 300 à 2000 ohms, suivant le nombre d'accumulateurs en tension qu'il s'agit de charger, et cela afin de ne dépenser que très peu de courant lorsque la machine ne charge pas. Quand l'opération de la charge est terminée, on retire la cheville placée au-dessus de la deuxième borne et l'on rompt ainsi complètement la communication entre la source et les accumulateurs.

227. Installation et entretien. — Les accumulateurs doivent être placés dans un endroit sec, à une température aussi uniforme que possible, dans une pièce bien ventilée à cause des gaz détonants qui se forment, et jamais dans la même pièce que les machines, qui seraient détériorées par les vapeurs acides dégagées par les accumulateurs.

Les auges doivent être parfaitement isolées du bâti qui les sup-

porte. Dans ce but, les pieds sont formés par des isolateurs en porcelaine, et il est même bon de les munir de godets d'huile qui donne un isolement parfait.

On doit vérifier souvent la force électromotrice de la batterie, au moyen d'un voltmètre ; on se base sur une force électromotrice moyenne de 2 volts par élément.

On doit encore constater au densimètre la densité du liquide qui donne des renseignements sur l'état des éléments, comme nous l'avons vu ci-dessus.

Les récipients ne doivent pas donner lieu à des fuites ; on s'exposerait ainsi à produire des communications avec la terre. On emploie à cet usage le grès, le verre, le bois doublé de plomb, l'ébonite. Le bois simplement enduit de résine ou de goudron ne convient pas, parce que ces matières sont attaquées à la longue par l'acide sulfurique. Pour empêcher les sels grimpants, les auges sont garnies à l'intérieur et à l'extérieur d'une couche de paraffine ayant quelques centimètres de hauteur.

Pour éviter les projections de liquide produites par la formation de bulles gazeuses qui viennent crever à la surface du liquide, on étend à chaud sur cette surface une couche de paraffine qui se solidifie et ferme le récipient. On perce un trou pour le dégagement du gaz et on enlève un peu de liquide pour ménager un vide. Les projections de liquide pourraient attaquer les conducteurs ou donner lieu à des communications avec la terre.

Le liquide doit toujours être préparé d'avance, et on ne le verse dans les auges qu'après refroidissement complet. Pour le préparer, il faut verser peu à peu l'acide sulfurique dans l'eau qu'on agite avec une baguette de verre. Il ne faut jamais ajouter d'acide pur dans les batteries.

Il est à remarquer que le mauvais fonctionnement des accumulateurs résulte presque toujours d'un entretien imparfait.

APPLICATIONS DES ACCUMULATEURS DANS L'INDUSTRIE

228. — Les accumulateurs présentent le grand avantage de pouvoir fournir à un moment donné et en un endroit quelconque le

courant dont on a besoin ; mais ils font amplement payer leurs services par leur poids considérable, leur faible durée, leur prix élevé et enfin par la perte d'énergie qui résulte de leur intervention.

Cette perte est en effet importante ; il suffit, pour s'en rendre compte de prendre un exemple. Supposons qu'il s'agisse d'une force de 100 chevaux fournie à l'arbre de la machine dynamo servant à charger la batterie d'accumulateurs. L'énergie disponible aux bornes de la dynamo sera de 90 chevaux ; mais une partie de cette énergie est absorbée soit par les conducteurs du circuit de charge, soit par la résistance qu'on ajoute pour régler l'intensité du courant ; on peut donc admettre que les accumulateurs ne recevront que 85 chevaux. En calculant sur le rendement de 60 p. 100, ils ne pourront ainsi développer que $85 \times 0,6$ ou 51 chevaux. En résumé, sur 100 chevaux développés par le moteur, on n'en retrouvera que 51 disponibles pendant la décharge.

Cette perte de 50 p. 100 suffit pour montrer quelles difficultés rencontrent aujourd'hui les applications industrielles des accumulateurs. Aussi ces applications sont-elles assez limitées ; nous allons les passer rapidement en revue.

229. Traction des tramways. — C'est actuellement le principal débouché des accumulateurs. Au point de vue de la commodité du service et de la régularité de l'exploitation, leur emploi pour la propulsion des voitures ne le cède à aucun autre système électrique. Une fois muni de sa batterie chargée, chaque véhicule renferme en lui-même la quantité d'énergie nécessaire à sa marche et se trouve, par suite, complètement indépendant. Avec une provision suffisante d'éléments, on peut, lorsque les circonstances l'exigent, mettre en mouvement le nombre de voitures que l'on veut, sans avoir à se préoccuper de modifier le régime de marche de l'usine génératrice. De plus, ce système ne dérange en rien la chaussée et est éminemment pratique dans les villes ; enfin, il n'offre pas l'inconvénient que l'on rencontre dans les autres procédés de traction électrique, avec lesquels les rails conducteurs peuvent produire des pertes de courant, nuisibles à la régularité du service et souvent même capables de donner aux passants et aux chevaux des secousses plus ou moins dangereuses.

C'est pour ces différentes raisons que, malgré leurs défauts, les accumulateurs paraissent être, au point de vue pratique, le seul système qui puisse être employé dans les villes pour la traction électrique des tramways. Nous étudierons cette question plus loin.

230. Propulsion des embarcations. — Les accumulateurs l'emportent de beaucoup sur les piles pour la propulsion des bateaux. Ils ne remplissent évidemment pas toutes les conditions qu'on peut demander dans un pareil service; mais les bateaux qui en sont munis offrent les avantages de ne pas nécessiter de combustible, de ne produire ni bruit, ni fumée, ni odeur, et enfin d'être toujours prêts à partir, toutes qualités importantes pour les canots de la marine de guerre.

Pour les autres embarcations, les accumulateurs ne peuvent servir que sur les bateaux de plaisance, en raison du prix élevé auquel conduit leur emploi.

231. Éclairage. — Les accumulateurs peuvent être avantageusement employés dans différents cas :

1° Pour les éclairages provisoires, comme ceux d'une salle de bal ou de réunion.

2° Lorsque la production ne marche pas de front avec la consommation. Dans les usines où la force motrice disponible n'est pas constamment utilisée, on peut charger une batterie secondaire qui donne, le soir, la lumière.

Les accumulateurs sont encore utiles dans les établissements où le nombre de lampes en certains moments est trop faible pour justifier l'emploi d'une machine dynamo.

Enfin, dans les hôtels particuliers dont l'éclairage varie constamment, ils fournissent une solution avantageuse.

3° Lorsqu'on ne possède pas un emplacement assez grand pour l'installation de machines à vapeur et de machines électriques pour l'éclairage total.

L'adjonction des piles secondaires permettant d'accumuler pendant le jour le complément d'électricité nécessaire pour la soirée, les machines et la batterie fournissent simultanément le courant aux lampes.

4° Comme réserve de sûreté en cas d'accident aux machines.

L'éclairage des lampes de secours imposées par la Préfecture dans les théâtres de Paris rentre dans cette catégorie.

5° Pour obtenir une lumière fixe.

Les accumulateurs constituent, dans ce cas, une sorte de volant qui régularise le courant. Ils sont à peu près nécessaires lorsque le moteur qui commande les dynamos actionne en même temps des machines-outils en nombre variable, et que l'effort résistant varie par suite constamment.

M. Reynier a proposé, à cet effet, des éléments spéciaux, ayant une capacité très faible, qu'il a appelés *voltamètres régulateurs* et qui servent à effacer les irrégularités produites dans l'éclairage par les variations de vitesse des machines. Il a même installé de cette manière, à l'Hôtel de Ville, de Paris, une batterie de 165 éléments, pouvant fonctionner sur un circuit de 2 400 lampes Edison de 10 bougies. Mais les services rendus dans ce cas ne paraissent pas justifier l'augmentation des frais de premier établissement qui en résulte.

6° Pour l'éclairage des voitures de chemins de fer.

Les accumulateurs sont chargés, soit avant le départ par une dynamo montée à poste fixe dans une gare, soit pendant la marche par une dynamo placée dans un des fourgons du train. Ces deux systèmes ont été essayés, le premier aux Etats-Unis sur la ligne de Boston à New-York, le second en Wurtemberg entre Stuttgard et Hall. Ils ont leurs avantages et leurs défauts respectifs, et l'expérience n'a pas encore montré lequel des deux devait être préféré dans la pratique.

7° Enfin, il existe, ainsi que nous le verrons plus loin, un système de stations centrales reposant sur l'emploi des accumulateurs et permettant de réduire la puissance mécanique de l'usine. Mais les frais de premier établissement n'en sont pas diminués, car l'achat de la batterie secondaire compense amplement l'économie faite sur les machines. D'un autre côté, au point de vue de l'entretien, le renouvellement des plaques doit entraîner à des dépenses importantes. Nous ne croyons donc pas qu'en l'état actuel de la science, les accumulateurs fournissent une solution avantageuse de la distribution de la lumière électrique par stations centrales.

232. Exemples numériques. — Nous avons dit plus haut que les accumulateurs pouvaient être réunis en tension et en quantité comme les éléments d'une pile ordinaire. Nous allons indiquer, par des exemples, la manière de calculer le nombre d'accumulateurs qu'on doit prendre pour effectuer un travail déterminé.

La première chose à faire est de chercher combien il faut mettre d'éléments en série pour avoir une force électromotrice supérieure à la différence de potentiel exigée par le programme. On s'occupe ensuite du nombre d'éléments qu'on doit disposer en quantité pour obtenir l'intensité demandée.

1° Combien faut-il prendre d'accumulateurs Gadot pour alimenter 20 lampes à incandescence Edison A de 100 volts et 0,75 ampère, réunies en dérivation ?

Supposons que nous prenions des éléments de 30 kilogrammes renfermant 20 kilogrammes de plomb ; leur force électromotrice est de 2 volts, et ils peuvent développer chacun 7200×20 ou environ 144 000 kilogrammètres.

Les lampes étant placées en dérivation, la différence de potentiel nécessaire sera de 100 volts. Il faudra donc 50 éléments reliés en série.

L'intensité dans chaque lampe étant de 0,75 ampère, l'intensité totale sera de $0,75 \times 20 = 15$ ampères. L'élément Gadot de 30 kilogrammes pouvant débiter jusqu'à 20 ampères, on n'aura pas besoin de mettre plusieurs éléments en quantité.

La consommation d'énergie sera pour une heure

$$\frac{100 \times 15 \times 3\,600}{9,81} = 550\,458 \text{ kilogrammètres.}$$

Chaque élément pouvant fournir 115 200 kilogrammètres, la durée de l'éclairage avec les 50 accumulateurs sera de

$$\frac{115.200 \times 50}{550.458} = 10^h,25.$$

2° Combien faut-il d'accumulateurs E. P. S. pour actionner un moteur électrique de 20 kilogrammètres, pouvant recevoir 25 ampères et susceptible d'un rendement de 70 p. 100 ?

Nous prenons des éléments type S pesant 10 kilogrammes. Leur

force électromotrice est de 2 volts, et leur capacité de 5 700 kilogrammètres par kilogramme de poids total.

Pour obtenir 20 kilogrammètres avec un moteur ayant un rendement de 70 p. 100, il faudra lui en fournir $\frac{20}{0,70}$ ou 28,57.

La force électromotrice nécessaire E sera donnée par

$$\frac{E \times 25}{9,81} = 28,57$$

d'où

$$E = 11,21 \text{ volts.}$$

Il faudra donc 6 éléments en tension.

Le débit à fournir étant de 25 ampères, et chaque élément n'en pouvant donner que 15, il faudra 2 éléments en quantité.

La batterie comprendra donc 12 éléments, reliés 6 en série et 2 en quantité.

La capacité d'un élément étant de 5 700 × 10 ou 57 000 kilogrammètres, et l'énergie absorbée par le moteur de 28,57 kilogrammètres par seconde, le moteur marchera pendant $\frac{57000 \times 12}{28,57} = 23\,941$ secondes, c'est-à-dire pendant 6 heures 39 minutes.

TROISIÈME PARTIE

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

FOYERS LUMINEUX

Les appareils destinés à la production de la lumière au moyen du courant électrique peuvent être classés en quatre catégories :

1° Lampes à arc ou régulateurs ;
2° Bougies ;
3° Lampes à incandescence en plein air ;
4° — dans le vide.

LAMPES A ARC OU RÉGULATEURS

233. Arc électrique. — C'est en 1813 que sir Humphry Davy observa pour la première fois des effets de lumière en faisant passer le courant fourni par 2 000 éléments zinc-cuivre entre deux baguettes en charbon de bois écartées l'une de l'autre. Il obtint un jet lumineux très intense ayant une forme légèrement arquée, et il lui donna le nom d'*arc voltaïque* qui lui a été conservé depuis cette époque.

Pour obtenir cet effet, il est absolument indispensable, quelle

que soit la source électrique dont on dispose, que les deux charbons soient d'abord mis au contact et qu'on les éloigne peu à peu l'un de l'autre. De plus, M. Masson a démontré que le courant électrique ne pouvait pas se développer dans le vide absolu. Ainsi la présence de l'air est nécessaire à la production de la lumière ; probablement cette lumière est due à la haute température qui provient de la résistance énorme opposée au passage du courant par la couche d'air comprise entre les deux pointes de charbon.

Cette résistance est trop forte pour que le courant la surmonte à froid. Mais quand on a pris la précaution de mettre préalablement les charbons au contact, l'air s'échauffe par le passage de l'électricité ; il devient plus conducteur, et lorsque la chaleur produite entre les charbons a suffisamment élevé la température ambiante, leur écartement n'empêche plus le courant de s'établir d'une façon continue. Les charbons sont alors portés à l'incandescence et deviennent la véritable source lumineuse.

La longueur de l'arc dépend de la tension de la source électrique. Avec 2 000 couples zinc-cuivre, dont les électrodes avaient environ 2 centimètres carrés, sir Humphry Davy obtenait un arc de 10 centimètres. M. Deprez a fait à ce sujet de nombreuses expériences ; il a d'abord étudié l'effet de la tension ; avec 25 éléments Bunsen en série, l'arc n'avait pas de dimensions appréciables ; à peine établi, il cessait presque instantanément. Avec 600 éléments en série, la longueur devenait égale à 20 centimètres. Il a reconnu que le nombre des éléments en tension n'exerçait que peu d'influence sur l'intensité de la lumière. Celle-ci augmente quand on passe de 50 à 100 éléments et de 100 à 600, mais pas d'une manière considérable.

Dans la seconde partie de ses expériences, M. Deprez a étudié les effets de la quantité. La pile étant montée par groupes de 25 éléments en tension, avec un seul groupe il observa un arc très faible qui se formait et se rompait presque subitement ; avec deux groupes en quantité, il avait une grande flamme, mais pas encore d'arc à proprement parler. Avec trois groupes, l'arc avait 1 millimètre ; avec 24 groupes, $11^{mm},5$.

L'énergie lumineuse était à peu près proportionnelle à la sur-

face des éléments ; 200 couples en deux séries de 100 éclairaient environ deux fois plus que 100 éléments simples ; et ainsi successivement jusqu'à 600 disposés en six groupes de 100.

D'après Edlund, il faut au moins 25 Bunsen pour produire un arc entre des pointes de charbon, 20 Bunsen entre des pointes de laiton, 12 Bunsen entre des pointes d'argent.

234. — L'arc voltaïque produit entre deux charbons de cornue cylindriques prend l'aspect de la figure 148. On remarque dans la partie centrale une sorte de traînée lumineuse composée de particules incandescentes qui se détachent des pointes. Il se forme à la surface des charbons de petits globules très brillants, produits par la silice et les matières étrangères qui entrent dans leur composition.

Fig. 148.

Les charbons se consument inégalement. Celui qui est en communication avec le pôle positif diminue environ deux fois plus vite que l'autre, en supposant qu'ils aient le même diamètre.

De plus, il se creuse en cratère, tandis que le négatif conserve à peu près sa forme pointue. Aussi, quand on dispose les charbons verticalement, met-on toujours le positif à la partie supérieure pour profiter de la réflexion lumineuse produite par sa concavité. Des expériences de M. Hippolyte Fontaine ont prouvé que l'intensité maxima de la lumière émise par un arc électrique se trouvait entre 32 et 60° au-dessous de l'horizontale, et qu'elle était environ dix fois plus grande que celle observée à 45° au-dessus.

Si l'on opère avec des courants alternatifs, on n'obtient pas le même effet ; les deux charbons s'usent également, et ils ont tous les deux la forme pointue que l'on observe au pôle négatif avec

un courant continu. Dans ce cas, la répartition de la lumière est moins avantageuse que précédemment, car on ne profite pas de la réflexion produite par le charbon supérieur.

235. Charbons électriques. — Davy se servait pour ses crayons de charbon de bois éteint dans l'eau ou le mercure ; mais la combustion en était très rapide. Foucault imagina d'employer du charbon de cornues à gaz ; c'était déjà un grand progrès. Cependant cette substance n'est pas homogène et contient beaucoup de matières étrangères, entre autres de la silice qui se volatilise et produit de petits éclats.

Aujourd'hui, on emploie généralement des charbons fabriqués suivant les procédés indiqués par M. Carré et par M. Gauduin, c'est-à-dire en préparant une pâte convenable, la triturant, la passant à la filière sous une pression d'une centaine d'atmosphères, et cuisant ensuite dans des fours les baguettes ainsi obtenues. M. Carré se servait d'un mélange de 50 parties de coke très pur en poudre, 20 parties de noir de fumée calciné et 30 parties d'un sirop de sucre gommeux. M. Gauduin obtenait son charbon en décomposant en vase clos des brais secs ; ce charbon réduit en poudre impalpable était aggloméré avec des carbures d'hydrogène provenant de la distillation des brais. Actuellement, la pâte est faite de charbon de cornue pulvérisé et aggloméré avec du goudron de gaz ; la qualité des crayons dépend surtout du broyage intime des substances employées et de leur cuisson.

On se sert aussi quelquefois au pôle positif de crayons dits *à mèche*, dans lesquels un trou central, fait à la filière, est rempli d'une matière plus conductrice de l'électricité que le charbon. Cette disposition maintient le foyer lumineux au centre du crayon et augmente la fixité et la régularité de la flamme. Toutefois les crayons à mèche ne sont pas très employés en raison de leur prix élevé.

Enfin, on fabrique encore des charbons sur lesquels on dépose du cuivre par l'électrolyse et qui sont d'une durée et d'une solidité supérieures à celles des crayons ordinaires. Mais la lumière qu'ils produisent est moins régulière au double point de vue de la couleur et de la fixité. Les crayons cuivrés ne sont guère adoptés qu'en Amérique, pour l'éclairage des voies publiques.

Le diamètre des crayons varie suivant l'intensité du courant : voici les chiffres sur lesquels on se base en général :

2mm	pour	2	à	3	ampères
4	—	3	à	5	—
5	—	4	à	6	—
7	—	7	à	10	—
9	—	10	à	11	—
10	—	11	à	15	—
11	—	12	à	16	—
12	—	13	à	20	—
13	—	15	à	34	—
14	—	16	à	25	—
15	—	25	à	30	—
17	—	30	à	45	—
18	—	35	à	60	—
20	—	40	à	80	—
25	—	50	à	120	—
30	—	80	à	180	—

Pour les arcs de plus grande dimension, on emploie, au lieu d'un charbon unique, un faisceau de petits crayons ou des charbons cannelés de James Douglas.

236. — La distance des deux pointes est une question très importante, car il existe, pour chaque source d'électricité dont on dispose, un maximum d'écartement qu'on ne peut dépasser, et il faut qu'on puisse d'une façon constante compenser l'usure des charbons, afin que cette distance reste invariable. Il est nécessaire, en outre, que le point lumineux demeure aussi fixe que possible.

Enfin, les deux charbons doivent d'abord être amenés au contact pour que le courant s'établisse, puis s'éloigner l'un de l'autre afin que l'arc se forme. C'est pour remplir les conditions de ce programme qu'on a imaginé les régulateurs.

Différents systèmes sont adoptés pour maintenir constant l'écartement des charbons d'une façon automatique ; ils reposent tous sur l'emploi d'un électro-aimant traversé soit par le courant total, soit par une dérivation, et dont l'action a pour effet d'imprimer aux charbons un certain mouvement par suite des variations de l'intensité du courant ou de la résistance de l'arc.

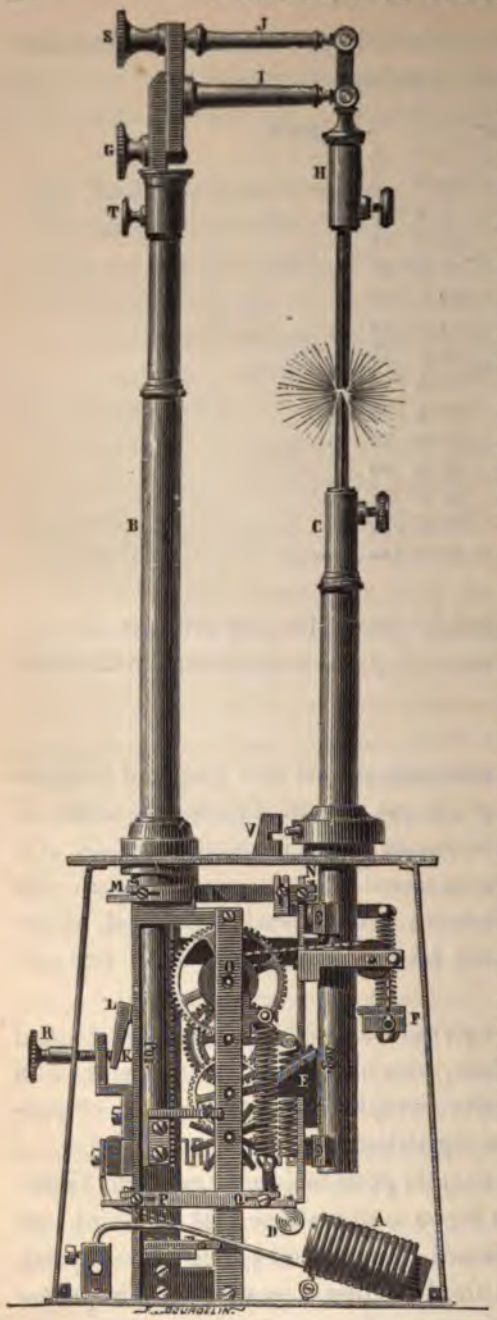


Fig. 149.

237. Régulateur Serrin. — Dans le régulateur Serrin, le charbon positif est porté par une crémaillère qui, agissant par son poids sur une série d'engrenages, sert de moteur et tend à produire le rapprochement des deux crayons. Ces engrenages sont calculés de façon que le point lumineux reste fixe ; dans ce but, le charbon positif, qui s'use deux fois plus vite que l'autre, descend d'une quantité double de celle dont le charbon négatif remonte.

L'éloignement des charbons (fig. 149) est produit par un double parallélogramme articulé M N P Q, relié au porte-charbon inférieur C et attaché à l'armature D d'un électro-aimant A. Deux ressorts à boudin agissent sur le parallélogramme pour neutraliser l'effet de la pesanteur.

La descente du charbon positif est régularisée par un petit volant à ailettes et par une roue étoilée dans laquelle s'engage un cliquet E porté par le côté vertical mobile du parallélogramme. Ce cliquet peut

ainsi arrêter le mouvement des engrenages et de la crémaillère, quand le parallélogramme s'abaisse par suite de l'attraction de l'électro A sur son armature D. Lorsque le parallélogramme se relève, le cliquet se dégage, les rouages se mettent en mouvement et produisent le rapprochement des charbons.

L'électro-aimant A placé dans le circuit même est traversé par le courant total. Voici comment fonctionne l'appareil.

Le poids de la crémaillère amène les charbons au contact. A ce moment le courant passe et, en actionnant l'électro-aimant, fait descendre le parallélogramme ; la roue à dents se trouve embrayée, le charbon positif s'arrête et le charbon négatif qui est relié au parallélogramme s'abaisse.

Quand l'arc s'allonge, l'intensité du courant diminue, le parallélogramme remonte sous l'action des ressorts et produit le déclenchement du cliquet, ce qui permet au charbon positif de descendre, jusqu'à ce que l'arc soit suffisamment raccourci et que l'intensité ait pris sa valeur normale. L'usure des charbons se trouve ainsi compensée d'une façon constante. Comme on le voit, ce sont les variations de l'intensité qui déterminent les mouvements réciproques des charbons.

Au moyen d'un bouton extérieur R, on modifie à volonté la tension des ressorts et la distance de l'armature à l'électro-aimant et l'on obtient un réglage du système.

La sensibilité de cet appareil est excessive ; on peut même dire que c'est quelquefois un défaut. Car la moindre variation de l'arc, due, par exemple, à des impuretés des charbons, détermine des oscillations, et comme le courant des machines dynamos dépend beaucoup lui-même de la résistance extérieure, c'est-à-dire de la résistance de l'arc, il en résulte une grande instabilité de la lumière.

238. — Il existe un grand nombre d'appareils construits sur le même principe. Nous citerons entre autres le régulateur Jaspar et le régulateur Siemens et Hefner-Alteneck, ou *lampe pendulum*, qui ne diffèrent de celui de Serrin que par quelques détails d'exécution ; mais nous ne les décrirons pas, parce que leurs applications sont peu nombreuses.

Tous les régulateurs de ce genre sont *monophotes*, c'est-à-dire qu'ils ne permettent de placer qu'un seul appareil dans le même circuit. Si l'on en met deux, en effet, le courant total agissant à la fois dans les deux électro-aimants, les deux lampes sont influencées en même temps. Si donc on suppose, par exemple, que la première lampe soit en parfait équilibre, tandis que l'arc est trop grand dans la seconde, le mécanisme, agissant automatiquement dans celle-ci, rapprochera les charbons et augmentera l'intensité qui deviendra alors trop forte pour la première lampe. On voit ainsi que les variations produites sur un appareil réagiront sur l'autre et qu'il sera impossible d'obtenir le réglage simultané des deux lumières. Aussi les lampes construites d'après ce système ne peuvent-elles guère servir que pour les phares ou pour des applications du même genre qui exigent un seul foyer lumineux. Dans l'industrie leur emploi est très limité.

239. Lampe différentielle Siemens. — Le problème que l'on a presque toujours à résoudre étant la division de la lumière, il importait de trouver une disposition qui permît d'installer plusieurs foyers lumineux sur le même circuit, de façon qu'ils fussent indépendants les uns des autres. La solution a été fournie par les courants dérivés. Les appareils comportent toujours un électro-aimant obéissant aux variations de l'intensité et faisant par là même changer la distance des charbons, mais ce n'est plus le courant principal qui l'actionne, c'est une dérivation.

La lampe différentielle de Siemens est construite d'après le principe suivant (fig. 150). Le porte-charbon *a* est fixé à l'extrémité d'un levier *cc'* mobile autour du point *d* et dont l'autre bout est relié à un barreau de fer doux SS'. Ce barreau pénètre dans l'intérieur de deux bobines, l'une T à fil très fin et à grande résistance, l'autre R à gros fil et à résistance très faible. Le courant électrique arrivant en L se partage entre les deux bobines. Une partie passe par R et alimente l'arc, l'autre traverse T, et elles viennent se réunir en *b* pour aller par L' à la lampe suivante. Ainsi le courant dérivé traverse une résistance T fixe très grande, et le courant principal traverse l'arc qui lui oppose une résistance variable avec la distance des charbons. Chaque bobine attire le

barreau de fer doux avec une force proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre de tours du fil. On comprend donc qu'il puisse se produire dans cet appareil une série de mouvements dépendant de la résistance de l'arc.

En effet, si la distance des charbons est trop grande, la résistance de l'arc s'accroissant en proportion, le courant augmentera dans la bobine T dont l'action deviendra plus forte, le barreau SS′ sera déplacé vers le haut et le mouvement du levier amènera le

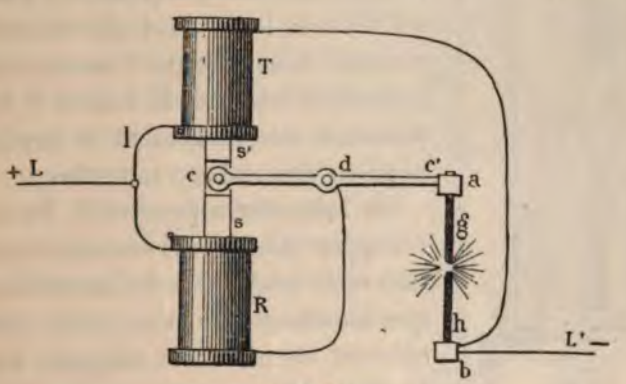


Fig. 150.

rapprochement des deux crayons. Si, au contraire, la résistance de l'arc diminue, c'est la bobine R qui devient prépondérante et le mouvement inverse se produit.

Si donc la résistance de l'arc est convenablement réglée et le rapport des résistances des deux bobines bien établi, l'équilibre du système est indépendant des variations d'intensité du courant total ; il ne dépend plus que du rapport des deux courants dérivés, c'est-à-dire du rapport des résistances des bobines et de l'arc.

Ce n'est plus l'intensité du courant total qui règle le régulateur, comme dans la lampe Serrin, c'est la résistance de l'arc.

On conçoit donc que l'on puisse disposer plusieurs appareils de cette sorte dans le même circuit. Car la résistance d'une lampe n'influe nullement sur la suivante ; elles sont toutes indépendantes l'une de l'autre, et l'on peut en alimenter sans inconvénient jusqu'à dix avec le même courant. Ces lampes ne sont exposées à s'éteindre que si le moteur s'arrête, et elles se rallument dès que

celui-ci se remet en marche. Enfin, on peut éteindre une lampe dans un circuit sans que les autres s'en ressentent.

Tel est le principe de cet appareil. Dans l'exécution, les détails ont été combinés de façon à amortir les oscillations (fig. 151). Le charbon supérieur, qui est seul mobile, est attaché à une crémaillère Z, et son mouvement est réglé par une roue à échappement et un petit pendule. Quand la bobine R est prépondérante, la crémaillère est rendue solidaire du levier *cc* et elle en suit le mouvement; mais, dès que l'usure des charbons permet à l'action de la bobine T de se faire sentir, le déclenchement se produit et le charbon descend par son poids.

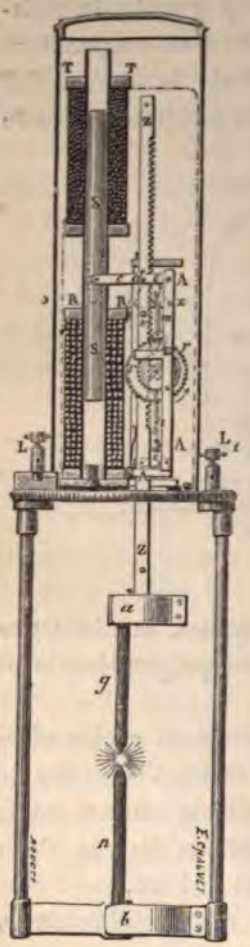


Fig. 151.

Le balancier a pour effet de ne laisser échapper qu'une dent seulement par oscillation et de rendre ainsi les mouvements presque imperceptibles. Une petite pompe à air agissant comme frein empêche les oscillations trop brusques.

Pour permettre de régler l'arc à la longueur normale qu'on désire, la bobine supérieure peut monter ou descendre, de façon que le barreau de fer doux S y soit plus ou moins engagé. Ce mouvement est obtenu par une tige filetée sur laquelle on agit par un bouton extérieur.

Dans ces lampes le point lumineux n'est pas fixe, puisque le charbon supérieur seul est mobile; mais il n'en résulte pas d'inconvénient dans la pratique. En outre, comme tout le mécanisme est placé au-dessus des charbons, le cylindre en cuivre qui lui sert d'enveloppe ne peut projeter aucune ombre lorsque la lampe est suspendue.

L'intensité d'une lampe Siemens dépend essentiellement du courant qui l'alimente; elle augmente lorsqu'on met peu de lampes

sur une machine et diminue quand le nombre de foyers s'accroît. Il est possible ainsi d'obtenir des intensités variant de 15 à 180 carcels.

On peut cependant prendre comme moyenne 35 à 40 carcels; chaque lampe exige alors 3/4 de cheval-vapeur environ et consomme par heure 9 centimètres de crayons; sa durée moyenne est de 4 heures et demie.

Comme nous l'avons dit plus haut, les régulateurs Siemens peuvent se mettre en tension; en général, on les divise en autant de groupes que l'on veut faire de circuits distincts : ces groupes sont réunis en dérivation; dans chacun d'eux les foyers sont en tension.

240. Régulateur Gramme. — Le principe du régulateur Gramme est le même que celui de Siemens; il consiste à régler la distance des charbons par un courant dérivé.

Le courant principal passe dans un électro-aimant fixe AA (fig. 152), dont l'armature C est reliée à deux tringles E, E qui portent le charbon inférieur. Deux ressorts à boudin R, R exercent une action antagoniste à l'effet de l'électro-aimant.

Quand le courant ne passe pas, les ressorts R, R font monter les tringles et amènent les deux crayons au contact; le courant s'établit alors et, son action se faisant sentir sur l'électro AA, le cadre s'abaisse et produit entre

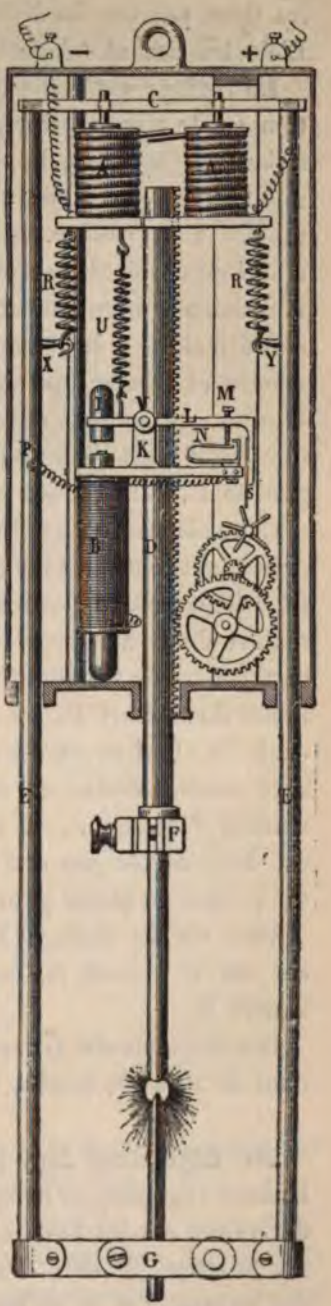


Fig. 152.

les deux pointes la distance nécessaire à la formation de l'arc. L'électro-aimant AA sert donc à l'allumage de la lampe.

Le réglage est obtenu par l'électro-aimant B placé en dérivation sur le circuit principal et muni d'un fil très long et très résistant. A cet effet, le porte-charbon supérieur, qui est suffisamment lourd, porte une crémaillère D engrenant avec le premier mobile d'un rouage. Le dernier mobile formé par une roue à cinq longues dents sert d'organe d'embrayage. Si l'arc s'allonge, la résistance augmente et la bobine de dérivation B agit; elle attire son armature I, le rouage est déclenché, la crémaillère peut descendre et l'arc se raccourcit. Cela fait, la résistance de l'arc ayant diminué, le courant de dérivation devient plus faible et l'armature de B n'est plus attirée; elle cède à l'action du ressort antagoniste U, et le rouage est embrayé.

Cette disposition ne diffère que par quelques détails de celle que présentent toutes les lampes différentielles. Mais voici ce qui constitue le caractère particulier du régulateur Gramme. Quand l'armature de B a débrayé le rouage, elle rompt en même temps le circuit dérivé ; dès lors l'attraction cesse et l'armature remonte par l'effet du ressort U, en embrayant le rouage et arrêtant la descente du charbon supérieur. Mais aussitôt le circuit se rétablit et, si le courant dérivé est assez fort, il se produit un second mouvement d'attraction, et ainsi de suite. La distance des charbons est donc réglée par une série de mouvements imperceptibles, ce qui permet d'obtenir pour la lumière une grande fixité.

Une vis de réglage M, portée par l'armature et venant presser sur le ressort N, sert à fermer la dérivation de l'électro-aimant B.

Les régulateurs Gramme se construisent sur trois types donnant de 20 à 30, de 70 à 150 et de 150 à 500 becs-carcels.

241. Régulateur Japy-Helmer. — La lampe différentielle Japy-Helmer (fig. 153) se compose de deux électros, l'un de fil fin S en dérivation sur les bornes de l'appareil, l'autre de gros fil S′ placé sur le circuit de l'arc. Dans chacun de ces solénoïdes se trouvent des noyaux A et A′ en fer doux reliés entre eux par un balancier B pivotant autour du centre O. Ce balancier porte sur sa branche

droite un petit taquet *e* qui au repos enclenche la tige de l'ancre d'échappement d'un mouvement d'horlogerie commandant par la roue D les déplacements des deux porte-charbons.

Le courant principal qui alimente l'arc, arrive à la borne *a*, traverse l'électro à gros fil S′ et vient en H à un balai qui l'amène à

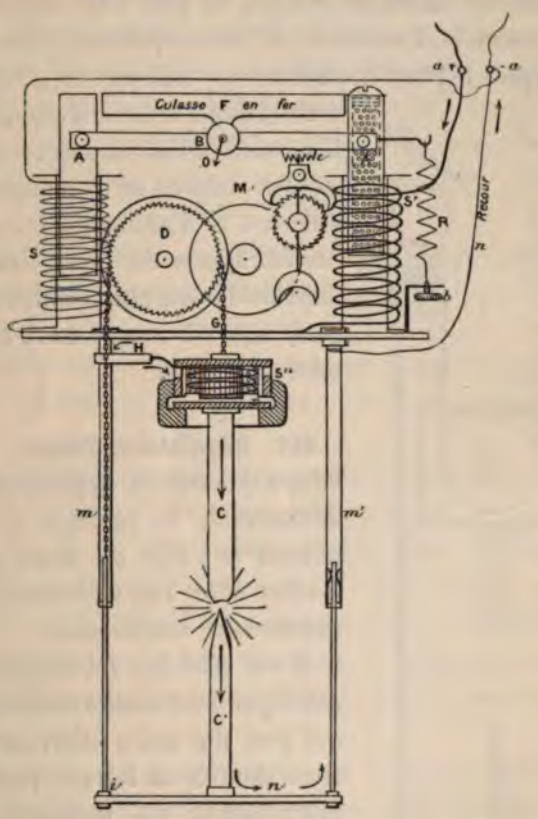


Fig. 153.

un troisième électro S″ servant à l'allumage. Il passe ensuite par l'arc, le porte-charbon *m′* et la seconde borne *a′*.

Cela posé, voici comment fonctionne l'appareil.

Quand la lampe est au repos, le ressort antagoniste R maintient le taquet *e* sur le mouvement d'horlogerie; celui-ci se trouve enclenché.

Dès que le courant passe, l'électro S″ agit sur son armature *p*

et soulève le porte-charbon supérieur ; l'arc est formé. La résistance de l'arc augmentant avec l'usure des charbons, le solénoïde S en dérivation entre en action et attire peu à peu le noyau A en entraînant le balancier ABA′ et dégageant le taquet *e* de l'ancre d'échappement. Le mouvement d'horlogerie se met en marche et rapproche les charbons jusqu'à ce que, l'arc ayant repris sa longueur normale, l'action de S′ contre-balance celle de S.

Quelques légères modifications ont permis de faire fonctionner cette lampe avec des courants alternatifs. Il a suffi de diminuer le nombre des fils sur les électros et d'arranger la palette *p* de l'électro S″ d'allumage de façon à empêcher les vibrations du porte-charbon supérieur; la palette n'est plus solidaire du porte-charbon, elle est simplement traversée par lui en son milieu.

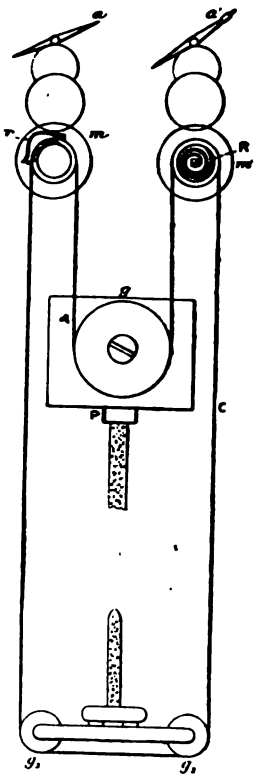


Fig. 154.

242. Régulateur Pieper. — Dans cette lampe qui repose également sur le système différentiel, le réglage des charbons est obtenu à l'aide de deux commandes distinctes dont l'une diminue et l'autre augmente leur écartement.

A cet effet les deux porte-charbons sont reliés par une chaîne métallique C (fig. 154) qui part du cadre inférieur, passe sur une roue dentée *m* faisant partie de l'un des mécanismes de réglage, embrasse une poulie *g* au cadre supérieur, passe sur une autre roue dentée *m′* qui appartient au second mécanisme de réglage et retourne au cadre inférieur. Il résulte de cette disposition que le mouvement de la chaîne dans un sens détermine le rapprochement des charbons, et dans l'autre produit un écart des pointes.

Ces deux mouvements inverses l'un de l'autre sont obtenus de la manière suivante. Deux bobines parallèles, l'une de gros fil en série sur le circuit, l'autre de fil fin en dérivation, ont une

armature commune formée d'une pièce de fer doux montée sur deux lames de ressort. Quand l'arc a sa longueur normale, les extrémités de l'armature sont à égale distance des deux bobines et calent les deux systèmes de réglage ; quand au contraire l'une des deux bobines l'emporte sur l'autre, par suite d'une augmentation, soit du courant qui traverse l'arc et la bobine à fil gros lorsque les charbons sont trop rapprochés, soit du courant de l'électro à fil fin lorsque les charbons sont trop éloignés, l'armature s'abaisse d'un côté ou de l'autre et déclenche l'un des deux mécanismes de réglage, celui qui produit l'écart des charbons dans le premier cas, celui qui détermine leur rapprochement dans le second.

Le rapprochement des charbons est obtenu par un mouvement simultané des deux porte-charbons dû à leur propre poids, l'écart des pointes est produit par un mouvement d'horlogerie. Chaque mécanisme commande en outre des rouages se terminant par une ailette destinée à ralentir et à régulariser les déplacements des charbons.

En outre, on peut régler à volonté la rapidité d'allumage de la lampe. A cet effet, l'ailette a', fixée au mécanisme de rapprochement des charbons, porte une masse mobile qui s'écarte du centre sous l'action de la force centrifuge, et vient frapper contre un butoir, de sorte que la vitesse est ramenée à zéro à chaque tour et que la masse mobile doit retomber en place pour permettre à l'ailette de passer. En variant la hauteur de la butée, on règle la rapidité de l'allumage.

La sensibilité de la lampe Pieper varie avec la distance des têtes des noyaux des électros à l'armature. Aussi le réglage peut-il être facilement établi de façon que chaque déclenchement ne laisse tourner l'ailette a que d'un tour ou d'un demi-tour.

Les régulateurs Pieper peuvent être placés en série ou en dérivation. Chacun d'eux prend 55 volts et de 6 à 10 ampères.

243. Régulateur Brush. — Les appareils décrits précédemment ont l'inconvénient d'exiger des mécanismes d'horlogerie. M. Brush, en se basant toujours sur le principe différentiel, a imaginé un appareil assez simple.

Dans son système (fig. 153), le charbon inférieur est fixe; l'autre est mobile. il tend à descendre par son poids et établit le contact entre les deux pointes. Le courant partant de X traverse deux bobines H et H' formant solénoïdes, et entre au point Q dans le porte-charbon supérieur. Une dérivation en fil fin reliant directement les deux bornes X et Y s'enroule aussi autour des deux mêmes bobines, mais en sens contraire du premier circuit (cette dérivation n'est pas indiquée sur la figure). Lors du passage du courant, le noyau sera donc attiré avec une force qui dépendra

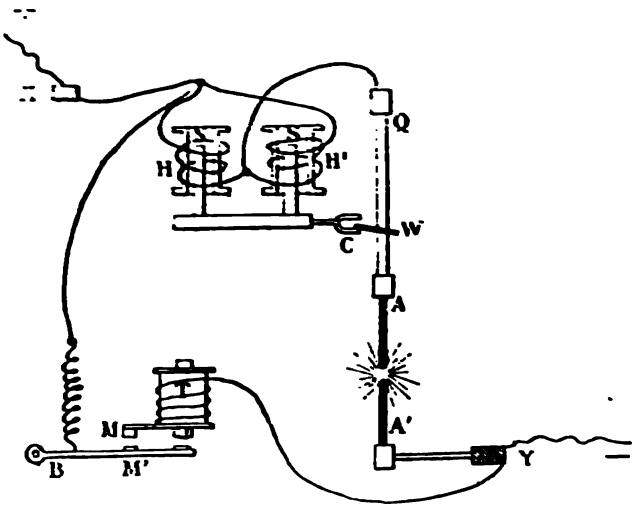


Fig. 155.

de l'action différentielle des deux circuits. Au moment de l'allumage, les deux charbons étant au contact, la dérivation n'agit pas, le noyau est fortement attiré et il entraîne le charbon supérieur par l'intermédiaire de la pièce C et de la bague W. A mesure que l'arc grandit, l'action de la dérivation devient de plus en plus forte, jusqu'à ce qu'elle fasse équilibre au solénoïde. La longueur de l'arc se trouve donc réglée par le rapport des résistances des deux fils.

Un détail assez intéressant est la façon dont le mouvement d'entraînement est communiqué au crayon supérieur; l'appareil que nous décrivons s'applique aux lampes à deux paires de charbons, destinées à brûler successivement et à augmenter ainsi la

durée de la lampe. Le barreau de fer doux qui s'engage dans le solénoïde étant placé en P (fig. 156), un levier LL, dont l'extrémité mobile est solidaire avec le barreau, soulève une pièce K représentée de face sur la figure 157. A chacun de ses bouts, cette pièce est en prise par une pince avec une rondelle W_1, W_2, et dans chaque rondelle est percé un trou à travers lequel passe la tige du porte-charbon. Comme le trou est un peu plus large que cette tige, tant que la rondelle est horizontale, elle n'a aucune action ; mais si la pièce K se soulève, le porte-charbon se trouve coincé et entraîné dans le mouvement. Dans la lampe à deux charbons, l'une des pinces est plus large que l'autre, en sorte que

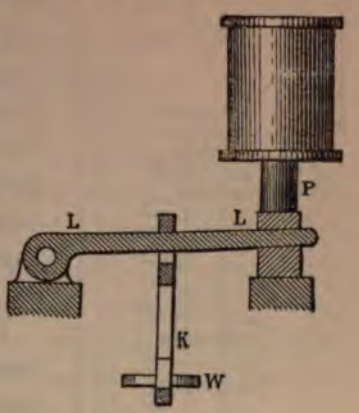


Fig. 156.

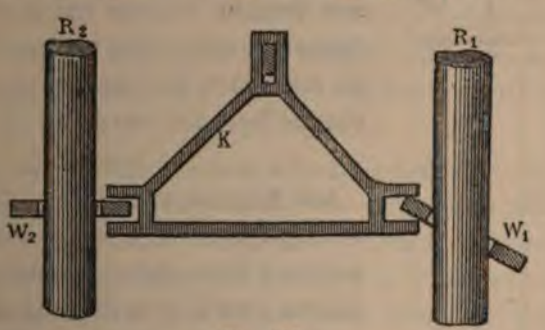


Fig. 157.

l'un des charbons est soulevé le premier ; l'arc se produit donc de ce côté jusqu'à ce que le charbon soit consumé.

L'appareil représenté en BT (fig. 155) a pour but de mettre automatiquement la lampe hors de circuit en cas d'accident, sans troubler la marche des autres lampes. Il se compose d'un électro-aimant T portant deux circuits de même sens ; l'un, formé de gros fil, relie directement les deux points X et Y en passant par BM'MT ; mais il peut être interrompu en MM'. L'autre circuit, composé de fil très fin, non figuré, est placé en dérivation sur la

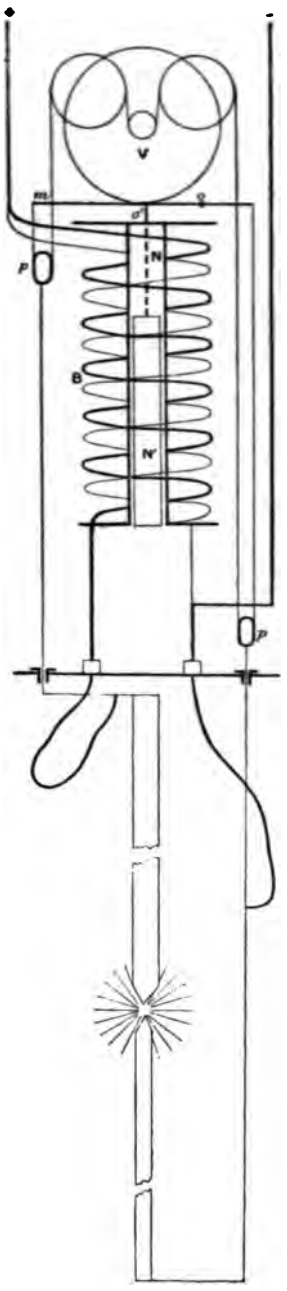


Fig. 158.

lampe et sur le même circuit que le fil fin du solénoïde du réglage. Tant que l'arc a sa longueur normale, ce dernier courant n'a pas d'action ; mais si l'arc s'allonge trop, l'intensité dans ce fil devient assez forte pour attirer l'armature BM' ; le contact se fait en MM', et le courant principal, traversant l'électro-aimant et ajoutant son action à celle du premier circuit, maintient l'armature soulevée. La lampe est dès lors mise hors de circuit.

Le système de M. Brush, ne comprenant ni engrenages ni ressorts, présente une grande simplicité ; il est très employé en Angleterre et aux États-Unis. Mais les régulateurs sont placés en série sur un même circuit ; il faut, par suite, une tension énorme qui n'est pas sans danger et exige des isolements parfaits. La différence de potentiel aux bornes de chaque foyer doit être de 45 volts environ.

244. Régulateur Bardon. — L'appareil de réglage de cette lampe comporte une bobine à deux enroulements en sens contraires, l'un de gros fil placé sur le circuit de l'arc, l'autre de fil fin relié en dérivation sur les bornes de la lampe (fig. 158). Le noyau de la bobine est formé par deux cylindres en fer doux, l'un N fixe occupant environ $\frac{1}{3}$ de la hauteur, l'autre N' mobile dans le sens vertical. Ce dernier se prolonge à sa partie supérieure par une tige de cuivre qui coulisse à l'intérieur du cylindre fixe et peut ainsi actionner le levier *mo*. Ce levier, articulé en *o*, vient presser sur le volant V et lui servir de frein.

Un cordonnet de soie est attaché aux extrémités du levier. Le bout partant de *m* passe d'abord sur une poulie *p* dont la chape supporte le porte-charbon supérieur, puis il s'enroule sur trois poulies à gorge ; celle du centre est solidaire du volant V ; enfin il passe sur la poulie *p'* qui est reliée au porte-charbon inférieur et vient s'attacher à l'extrémité du levier *mo*.

Quand le courant n'agit pas, le poids du porte-charbon inférieur ramène les crayons au contact. Lorsqu'on ferme le circuit, le courant principal ayant une grande intensité, l'action du solénoïde à gros fil est prédominante. Le noyau N' est attiré vers le noyau fixe N, et sa tige pousse le levier *mn*. Le bout *m* monte, et *n* descend pendant un instant très court qui est limité par le calage du volant V. Ce mouvement produit l'éloignement du charbon et donne naissance à l'arc qui prend son régime normal.

Quand l'usure des charbons augmente la distance des deux pointes, la résistance de l'arc s'accroît. Le circuit dérivé devient prédominant, le noyau mobile est moins attiré, le bout *m* du levier s'abaisse, le volant V se trouve libre et la cordelette, en se défilant, ramène les charbons à leur distance normale. Le mouvement s'opère ainsi d'une façon continue et sans secousses.

245. Régulateur de MM. Piette et Krizik. — La lampe de Piette et Krizik, appelée souvent lampe Pilsen du nom de la ville où elle est fabriquée, est du système différentiel; mais la construction des solénoïdes présente quelques détails originaux. Les auteurs, après avoir étudié les lois de l'attraction d'une barre de fer dans un solénoïde, ont cherché quelle influence pouvait avoir la forme même de cette barre, et ils sont arrivés à la combiner de telle façon que les effets d'attraction s'exercent d'une manière constante.

La forme qui leur a paru satisfaire le mieux aux conditions du problème est celle de deux cônes accolés par leurs bases. En effet, l'attraction d'un solénoïde varie pour un barreau cylindrique suivant la quantité dont celui-ci est enfoncé. L'attraction est maxima quand le bout du barreau est au niveau de la ligne médiane du solénoïde. Si l'on enfonce davantage la tige, l'attraction diminue, et elle devient nulle lorsque le milieu de la tige coïncide avec le milieu du solénoïde. En faisant varier le diamètre du noyau, grâce

à l'emploi de deux cônes. L'action attractive reste la même presque sur la moitié de la tige. On peut donc obtenir ainsi un mouvement régulier de cette dernière.

Le régulateur de Piette et Krizik est basé sur ce principe (fig. 159), seulement les deux parties coniques du noyau ne sont pas superposées; elles sont suspendues à une poulie R et s'engagent respectivement dans les deux solénoïdes A, B. Le solénoïde à gros fil B est placé sur le circuit de la lampe, ainsi que l'électro-aimant E dont nous expliquerons plus loin le rôle. Le solénoïde A, qui est en dérivation sur les bornes *x*, *y*, se compose de deux fils, l'un *fd* de résistance égale à l'arc, l'autre *af* très fin et de grande résistance. Enfin les deux noyaux sont fixés à des tubes S, T en laiton qui supportent les charbons, et auxquels le courant arrive par les petites poulies *a*, *b*.

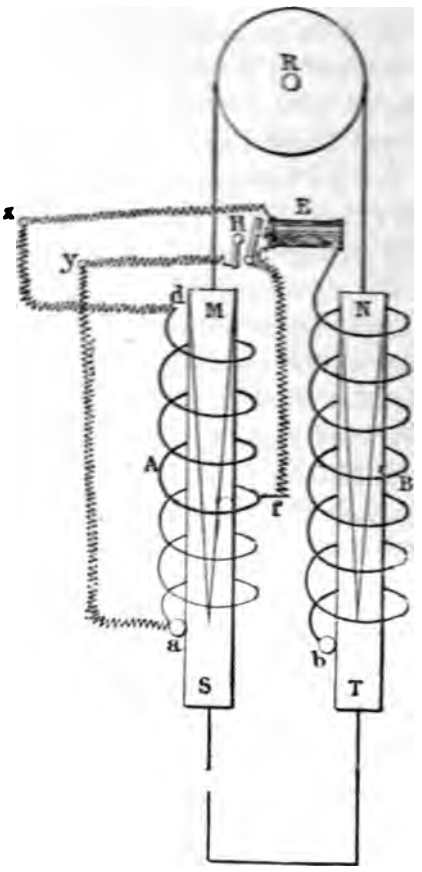


Fig. 159.

Lorsque les charbons sont en contact, le courant passe par B; le noyau N se trouve donc attiré plus fortement que M et descend tandis que M remonte; l'arc prend naissance. Mais au fur et à mesure de l'usure des charbons, la résistance augmente dans le circuit de B; l'action sur N diminue, celle sur M croît jusqu'au moment où M est attiré, ce qui produit le rapprochement des charbons. Ceux-ci étant mobiles tous les deux, le point lumineux est sensiblement fixe.

L'électro-aimant E est destiné à mettre la lampe hors de circuit

lorsqu'elle vient à s'éteindre. Dans ce cas, en effet, l'armature C n'est plus attirée et vient toucher le contact H qui communique avec la borne de sortie y. Le courant, arrivant par xd, parcourt alors le gros fil df du solénoïde A et revient par C et H à la borne y. La lampe se trouve hors de circuit sans que les autres foyers cessent de fonctionner.

La lampe Pilsen est fabriquée en France par M. Fabius Henrion.

246. Régulateur Cance. — Les régulateurs différentiels que nous venons d'étudier permettent d'obtenir la division de la lumière. On peut encore arriver au même résultat en mettant simplement les foyers en dérivation sur les bornes de la machine électrique. L'installation comprend alors autant de circuits dérivés que de foyers, mais ces circuits sont tous alimentés par une seule dynamo.

Cette disposition présente l'avantage que les lampes possèdent des organes moins nombreux et moins délicats et sont d'une construction plus simple. Il faut, il est vrai, une plus grande quantité de conducteurs de cuivre qu'avec le système en série ; mais le courant de la machine a une force électromotrice moins élevée, ce qui est souvent utile dans les installations d'éclairage électrique, quand on veut, par exemple, alimenter simultanément avec la même dynamo des lampes à arc et à incandescence.

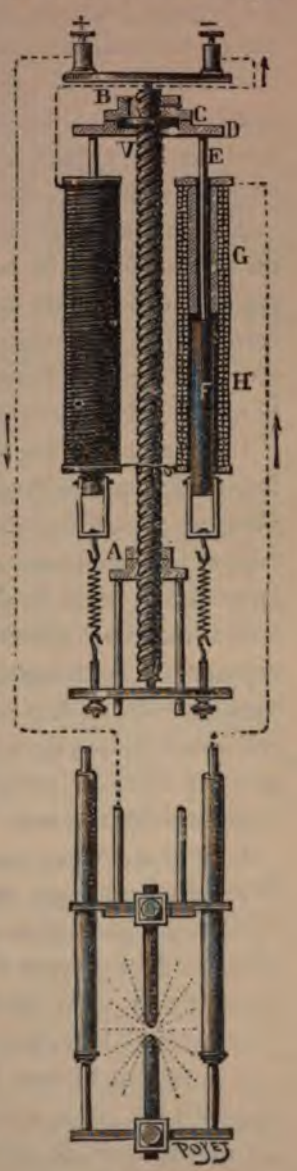


Fig. 160.

Le régulateur Cance (fig. 160) doit être placé dans cette classe d'appareils. Il possède une fixité remarquable ; cette qualité tient à la nature de son mécanisme qui

constitue une sorte de frein électrique très sensible et donne au charbon des déplacements excessivement lents.

L'organe principal du mécanisme consiste en une vis centrale V, placée verticalement entre deux pivots, et sur laquelle peut courir un écrou A appelé écrou moteur supportant le charbon supérieur. Cet écrou tend à descendre par son propre poids et, comme il ne peut tourner puisqu'il est relié aux deux tringles qui supportent le charbon supérieur, il fait tourner la vis de gauche à droite.

Au sommet de la vis et engagé dans ses filets, se trouve placé un second écrou B, appelé écrou régulateur, qui repose sur un petit plateau B calé sur la vis et limitant ainsi la descente de cet écrou. Si la vis tourne de gauche à droite sous l'action de la pesanteur de l'écrou moteur, l'écrou régulateur se trouve entraîné dans le même sens de rotation.

Ce sont ces trois organes principaux qui, par l'ensemble de leurs différents mouvements, déterminent l'allumage, l'avancement progressif des charbons et par conséquent le réglage de la lampe. Ces mouvements sont régularisés au moyen d'un plateau annulaire D muni de deux bras diamétralement opposés et placés à une très faible distance de l'écrou régulateur. Ce plateau vient reposer par l'extrémité de ses bras sur deux tiges de cuivre E passant chacune au travers d'un cylindre de fer doux G fixé dans un solénoïde H. Les tiges E sont reliées à deux noyaux de fer doux F mobiles dans les solénoïdes. Deux ressorts de réglage servent à équilibrer les noyaux.

Cela posé, voici comment fonctionne l'appareil. Au repos, les deux charbons sont en contact. Lorsque le courant circule dans la lampe, il passe d'abord par les charbons, puis par les solénoïdes, dont les deux noyaux G s'élèvent en entraînant avec eux le plateau annulaire D, et la surface de ce plateau vient adhérer à celle de l'écrou régulateur. Les noyaux F et le plateau D, continuant à monter, soulèvent l'écrou B, qui, ne pouvant plus tourner lui-même, puisqu'il fait corps avec D, fait tourner la vis de droite à gauche. Ce mouvement de rotation détermine un mouvement rectiligne ascensionnel de l'écrou moteur, les charbons s'écartent d'une petite quantité, l'arc se forme, l'allumage se produit.

Mais, par suite de l'usure des charbons, l'écart entre ceux-ci aug-

mente, ainsi que la résistance opposée au passage du courant ; l'intensité du courant qui circule dans la lampe et dans les solénoïdes diminue, et les noyaux mobiles descendent, sollicités par leur propre poids et par les ressorts antagonistes. A ce moment, le disque D et l'écrou régulateur descendent simultanément.

Ce mouvement de descente s'opère jusqu'au moment où l'adhérence du disque annulaire D et de l'écrou régulateur B devient assez faible pour ne pas résister à l'action de la pesanteur déterminée par l'écrou moteur, qui par son mouvement descendant vient progressivement rapprocher les charbons.

C'est alors que commence le réglage qui s'obtient par une faible variation dans l'adhérence des surfaces du plateau annulaire et de l'écrou régulateur. Aussitôt que les charbons sont usés d'une très petite quantité, l'intensité du courant dans les solénoïdes diminuant un peu, l'intensité magnétique des noyaux diminue par suite. Ces noyaux descendant faiblement soulagent l'adhérence des deux surfaces, qui deviennent alors un frein se modifiant de puissance par les actions différentes et progressives d'avancement ou d'arrêt des charbons à des intervalles de temps très rapprochés.

C'est donc le frottement de la plaque D sur l'écrou qui règle l'intensité lumineuse du foyer, et, comme il dépend lui-même de l'action des solénoïdes sur leurs noyaux, il est facile de comprendre que l'appareil ainsi construit est susceptible d'une très grande précision.

Il est de plus à remarquer que la disposition en dérivation a pour effet de produire le réglage réciproque des lampes. Considérons le cas de deux lampes A et B placées en dérivation sur les pôles de la machine, et supposons que, la lampe A fonctionnant, on vienne à allumer la lampe B. Le courant total augmente d'intensité par suite de la diminution de la résistance et se divise en deux parties ; mais, comme les charbons de B se touchent, le courant de B est plus fort que celui de A. La lampe B se trouve aussitôt mise en fonction par l'action énergique des solénoïdes, tandis que les charbons de A se rapprochent un peu à cause de la diminution de l'intensité du courant qui y passe. Si, par la suite, l'écart entre les charbons d'une des lampes devient plus grand que dans l'autre,

le courant augmente dans cette dernière, et diminue dans la première dont les charbons sont forcés de se rapprocher. On voit donc que chaque lampe se trouve être le régulateur de l'autre.

Comme nous l'avons déjà dit, les régulateurs Cance se placent en dérivation : on les monte ordinairement en se servant d'un tableau de distribution, où viennent aboutir les deux conducteurs de la dynamo et à partir duquel le courant se distribue dans les différents circuits comprenant chacun un foyer. Cette disposition permet de rassembler sur un même point tous les commutateurs et interrupteurs de l'installation et augmente la facilité des opérations.

Enfin, comme, dans une installation d'éclairage électrique, les lampes ne se trouvent pas toutes placées à la même distance du tableau de distribution et que les différents circuits n'ont pas la même résistance, condition nécessaire au bon fonctionnement des foyers, M. Cance intercale sur chaque circuit un rhéostat dont il fait varier la valeur suivant les besoins.

Ce rhéostat se compose d'un fil de maillechort enroulé sur un cylindre isolant de manière à former une hélice à pas régulier. Le courant arrive à l'une des extrémités de ce fil et le parcourt jusqu'à un curseur qui fait contact avec le fil et par lequel il sort du rhéostat. En déplaçant ce curseur suivant une génératrice du cylindre, on peut modifier à volonté la longueur du fil traversé par le courant ; on fait ainsi varier la résistance intercalée sur le circuit et l'on arrive facilement à donner la même résistance aux différentes dérivations.

Le type principal sur lequel sont construites les lampes Cance donne de 40 à 45 carcels ; ses constantes sont de 7 ampères, de 50 volts aux bornes de chaque lampe et de 65 à 70 volts aux bornes du tableau de distribution.

Il existe en outre un nouveau modèle, utile dans les applications industrielles, donnant de 20 à 25 carcels avec 4 ampères et 45 volts.

Enfin nous devons ajouter que, lorsque les circonstances exigent que les lampes soient reliées en série, il suffit de modifier légèrement le mécanisme de l'appareil pour pouvoir adopter ce montage.

247. Régulateur Thomson-Rice. — Le régulateur Thomson-Rice, construit par la Société américaine Thomson-Houston et fort employé aux États-Unis, surtout pour l'éclairage des voies publiques, comprend deux électro-aimants (fig. 161). L'électro de mise en marche E′ est formé de gros fil et placé sur le circuit même de l'arc. L'électro de contrôle E possède deux enroulements,

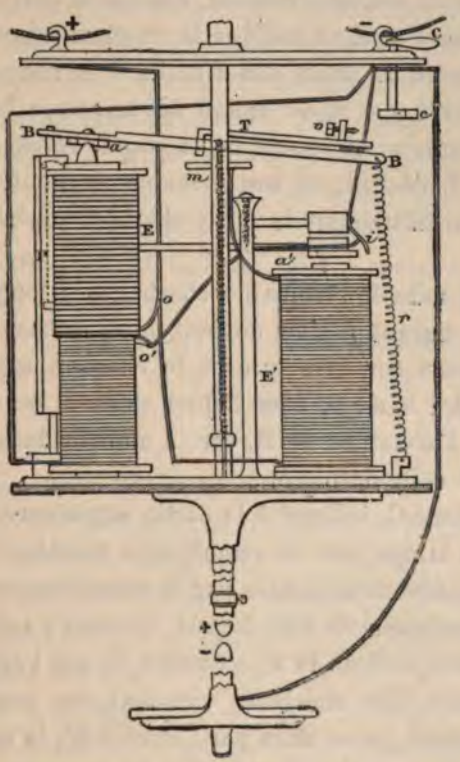


Fig. 161.

l'un en gros fil, l'autre en fil fin, disposés de telle façon que leurs actions s'ajoutent, et il se trouve en dérivation sur les bornes de la lampe ; de plus, le point de jonction o' de ces deux fils est relié à la borne négative par l'intermédiaire du contact i fixé sur l'armature de l'électro E′, lorsque cette armature n'est pas attirée ; dans le cas contraire, le contact i est coupé. Enfin l'armature de E en est maintenue éloignée par un ressort antagoniste r ; dans cette position, elle retient le porte-charbon supérieur entre les

mâchoires d'une petite pince annulaire et l'empêche de descendre.

Cela dit, voici comment l'appareil fonctionne. Les charbons étant supposés éloignés l'un de l'autre, le circuit de l'arc et par suite de l'électro E′ est ouvert quand on envoie le courant. Celui-ci passe par le gros fil de E, et du point *o′* se rend directement à la borne négative par le contact *i*. L'électro E agit donc sur son armature qui, dans son mouvement, dégage le charbon supérieur; ce dernier descend et vient toucher le charbon négatif.

Aussitôt l'électro E′ attire son armature et rompt le contact *i*. Le courant dérivé est donc obligé de traverser le fil fin. Mais son intensité diminue en raison de la grande résistance de ce fil; l'attraction de E décroît, et son armature remonte sous l'action du ressort *r*, en entraînant le porte-charbon supérieur. L'arc se trouve établi.

Lorsque, par suite de l'usure des charbons, la longueur de l'arc augmente, le courant dérivé devient plus intense ; l'électro E attire de nouveau son armature et le charbon supérieur redescend. Le cylindre à air *p*, dans lequel se meut un piston relié à l'extrémité de l'armature B B, sert à amortir la brusquerie des mouvements de cette dernière.

Le commutateur C, indiqué à la partie supérieure de l'appareil, sert à mettre la lampe hors de circuit sans troubler le fonctionnement des autres foyers alimentés par le même courant. Lorsqu'on tourne ce commutateur de 180 degrés, la came *c* agit, par l'intermédiaire de la vis *v* et de la tige coudée T, sur l'armature BB et la fait descendre. Les charbons viennent au contact, et l'arc s'éteint ; le courant passe alors par l'électro E′, le massif de l'appareil, la plaque *m*, la tige T et la tige du commutateur C, d'où il arrive à la borne négative.

Le régulateur Thomson-Rice se construit sur deux modèles : l'un donne 1 200 bougies avec 45 volts et 6,8 ampères ; l'autre 2 000 bougies avec 50 volts et 10 ampères.

En outre des systèmes dont nous venons de parler, il existe un nombre considérable de régulateurs plus ou moins ingénieux. Il nous est impossible de les énumérer tous et nous devons nous contenter de la revue précédente, dans laquelle nous nous sommes

efforcés de réunir les types qui répondent le mieux aux exigences des applications industrielles.

BOUGIES

248. Bougie Jablochkoff. — Tous les régulateurs que nous avons passés en revue jusqu'ici, exigent un certain mécanisme pour produire l'arc voltaïque et maintenir les charbons à leur distance normale. Le but des bougies Jablochkoff est de supprimer complètement toute cette complication. Au lieu de placer les charbons dans le prolongement l'un de l'autre et d'opérer mécaniquement leur rapprochement, on les a mis parallèlement, en les séparant par une matière suffisamment isolante qui se consume en même temps qu'eux (fig. 162). A leur partie inférieure ils sont placés dans un support métallique qui sert aussi à leur amener le courant et est, à cet effet, fixé sur un chandelier. Les trois points les plus importants sont donc la nature des charbons, la composition de la matière isolante et la disposition du chandelier.

Fig. 162.

Les charbons généralement employés sont fabriqués par M. Carré ; ils ont 4 millimètres de diamètre.

La matière isolante se nomme *colombin*. Elle a donné lieu à des recherches assez nombreuses ; car elle a plusieurs conditions à remplir. Il faut qu'elle isole bien à froid et qu'à la température de l'arc voltaïque elle devienne assez conductrice pour assurer le passage du courant, sinon l'électricité se répartirait sur toute la longueur des charbons et l'arc ne serait pas limité seulement à leur extrémité. Le colombin doit se consumer dans le même temps que les charbons ; il ne faut pas qu'il subisse de retrait et qu'il laisse d'espaces vides.

On employa d'abord le kaolin ; mais sa fabrication exigeait des précautions assez délicates. On est arrivé à lui substituer maintenant un mélange de deux parties de sulfate de chaux et d'une partie de sulfate de baryte, qu'on moule très rapidement et sans la moindre difficulté, et qui a l'avantage de se volatiliser dans l'arc.

Comme les deux charbons sont isolés, il faut, pour que l'allumage puisse se faire, que les deux pointes soient mises en communication. Dans ce but, M. Jablochkoff interposait entre les deux charbons un bout de charbon ou un fil métallique maintenu par un petit ruban ou un papier. Maintenant, on trempe simplement l'extrémité de la bougie dans une pâte de charbon. Sous l'action du courant, ce corps conducteur se consume rapidement et permet à l'arc de prendre naissance et de se continuer ensuite aux dépens du colombin.

Comme avec une machine à courant continu un charbon brûle deux fois plus vite que l'autre, on ne peut en faire usage avec la bougie Jablochkoff, et il est indispensable d'employer des courants alternatifs. Les dynamos Gramme, décrites § 203, donnent de très bons résultats.

Les bougies Jablochkoff se placent en tension sur le circuit qui les alimente.

249. Chandeliers. — Un inconvénient de la bougie est sa courte

Fig. 163.

durée. Pour y remédier, on emploie des chandeliers à plusieurs bougies (fig. 163) ; le nombre de quatre est ordinairement adopté. Elles sont placées dans des pinces à ressort dont les branches sont isolées l'une de l'autre et communiquent avec les fils du circuit. Quand une bougie est consumée, un commutateur permet de lui en substituer une autre. Cet appareil peut être manœuvré à la main ou marcher automatiquement. Dans le premier cas, on s'arrange

généralement de façon à disposer autant de circuits qu'il y a de bougies sur un chandelier; ces circuits sont alors commandés par un commutateur central. Quand un chandelier porte quatre bougies, il lui suffit de cinq conducteurs, les quatre premiers étant réunis chacun à une bougie, et le dernier servant de fil de retour commun.

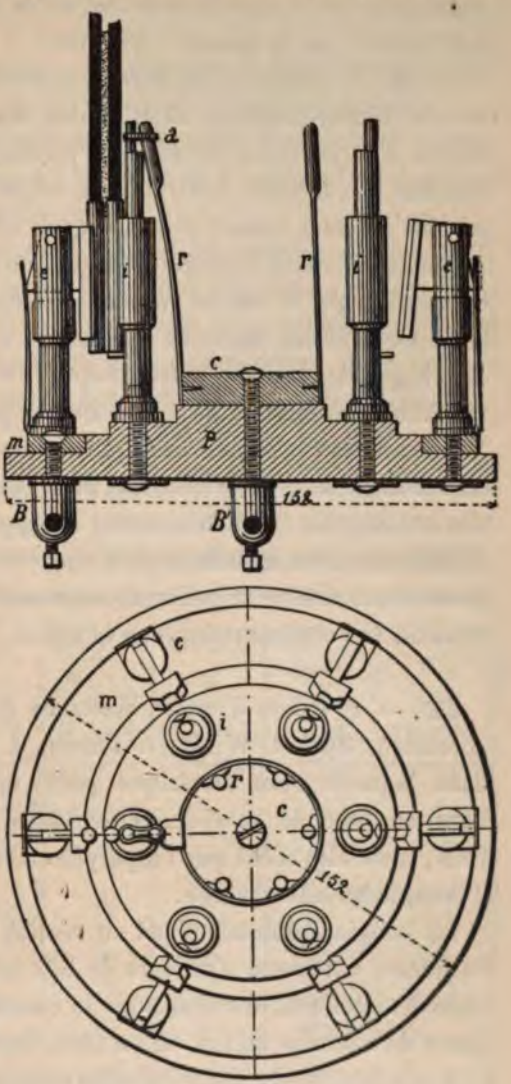


Fig. 164.

Plusieurs systèmes de commutateurs automatiques ont été imaginés. Celui de M. Bobenrieth, actuellement appliqué d'une manière à peu près exclusive, est un chandelier à dérivation dont le principe a été proposé par M. Gadot. Ce dernier avait reconnu en effet que, lorsque le courant était amené dans toutes les bougies à la fois, la moins résistante s'enflammait seule; mais il arrivait que le courant passait d'une bougie à une autre, les désamorçait toutes et n'en consumait aucune. Cet inconvénient a été évité par M. Bobenrieth en augmentant considérablement la résistance des amorces et la portant à plus de 20 000 ohms, tandis qu'elle n'était anciennement que de 15 ohms au maximum.

Le montage en dérivation des bougies qui doivent brûler successivement et la mise hors de circuit de celles qui sont consumées sont réalisés de la manière suivante :

Un des conducteurs du circuit arrivant à la borne B (fig. 164) est en communication avec toutes les pinces extérieures *e* au moyen d'un cercle métallique *m* qui les réunit; l'autre aboutit par la borne B′ à la pièce centrale *c* et est relié aux pinces intérieures *i* par des ressorts plats *r* et des bagues en plomb *a*.

Quand le circuit est fermé, le courant se fraye un passage à travers la bougie la moins résistante, l'allume et la brûle jusqu'au bout. Lorsque les charbons sont usés, l'arc, se trouvant à la hauteur de la bague de plomb *a*, la fait fondre, le ressort *r* s'écarte, la communication est interrompue, et le courant passe par une autre bougie.

Grâce à la résistance des amorces, les changements anormaux sont complètement évités. Ce perfectionnement est d'un emploi très avantageux : non seulement il supprime un service onéreux et difficile dans les installations d'une certaine importance, mais, en permettant d'user régulièrement les charbons, il réduit de 1/6 environ la consommation des bougies.

250. — Il existe d'autres systèmes de bougies électriques sans colombin, dues à Wilde, à Jamin, à Debrun. La lampe-soleil, dans laquelle l'arc électrique jaillit entre deux charbons placés dans un bloc de marbre, rentre aussi dans cette classe d'appareils, mais elle n'est pas employée en raison de la grande quantité d'énergie qu'elle absorbe.

La bougie Jablochkoff est en réalité le seul foyer industriel de ce genre. Elle rend d'ailleurs de très grands services dans l'éclairage des ateliers, des chantiers de construction, des magasins, des gares de chemins de fer, en un mot, dans toutes les applications où l'on n'a pas besoin d'une lumière absolument fixe ; car elle donne lieu à des variations continuelles d'éclat et de coloration, dues sans doute à quelques petites différences dans la composition et la conductibilité du colombin.

Pour amortir l'éclat du foyer, il est nécessaire de l'entourer d'un globe de verre opalin ou de verre craquelé. Il se produit par ce fait une perte de lumière assez considérable. Ainsi le globe de

verre opalin laisse passer 0,575 de l'intensité lumineuse moyenne; le globe clair, 0,67 à 0,75.

251. Dépense de force motrice. — La dépense de force motrice varie avec le diamètre des charbons et l'intensité lumineuse produite.

Les charbons de 6 millimètres de diamètre donnent 60 carcels avec une dépense de 1 cheval 1/2; ceux de 4 millimètres donnent 45 à 50 carcels et absorbent 1 cheval.

Avec 3 millimètres, on obtient 25 à 30 carcels, et l'on peut placer 12 bougies sur une force de 4 ou 5 chevaux.

L'expérience a démontré que la bougie de 4 millimètres devait être préférée dans tous les cas; avec une dépense de 1 cheval, elle éclaire amplement l'espace dans un rayon de 10 mètres.

DÉPENSE DE FORCE MOTRICE DES RÉGULATEURS ET DES BOUGIES

252. — Nous résumons dans le tableau ci-dessous les renseigne-

DÉSIGNATION DES FOYERS	INTENSITÉ lumineuse EN CARCELS	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes du foyer EN VOLTS	INTENSITÉ en AMPÈRES	TRAVAIL ÉLECTRIQUE absorbé par le foyer en kilogrammètres	TRAVAIL absorbé sur la machine en CHEVAUX
Régulateurs					
Siemens (courants alternatifs). . .	40	45	11	49	3/4
Siemens (courants alternatifs). . .	de 80 à 100	45	22	99	1,1/2
Siemens (courant continu). . . .	40	50	10	50	3/4
Gramme.	30	50	6	30	3/4
—	150	50	12	60	1,1/2
—	500	50	24	120	3
Pieper.	45	55	6	33	1
Brush.	120	45	6	27	1
—	200	45	10	45	1,1/2
Cance.	45	50	7	35	1
—	20	45	4	18	1/2
Thomson-Rice . .	150	45	68	31	1/2
— . . .	250	50	10	50	3/4
Bougies					
Jablochkoff 4mm .	45	42	8	33,6	1
— 6mm .	90	45	13,5	60,75	1,1/2

ments relatifs au fonctionnement des différents foyers que nous venons d'étudier: nous devons toutefois faire remarquer que les intensités lumineuses de 100, 200 et 500 carcels, indiquées par les constructeurs, sont purement nominales et sont loin d'être obtenues réellement dans la pratique.

LAMPES A INCANDESCENCE

253. Considérations générales. — Dans tous les systèmes que nous avons examinés jusqu'à présent, la lumière est produite entre deux charbons écartés plus ou moins l'un de l'autre, et elle est due à la haute température développée par le passage du courant, soit à travers la couche d'air, soit à travers un corps mauvais conducteur interposé entre les deux pointes. Pour produire de la lumière par incandescence, on procède d'une façon différente et l'on fait passer le courant à travers un corps solide fort résistant, dont la température s'élève à un très haut degré et qui devient lumineux.

Il y a deux classes d'appareils basés sur ce principe. Les uns, fonctionnant à l'air libre, déterminent la combustion du conducteur; la lumière est due à la haute température causée par la résistance de celui-ci et par sa combustion. Les appareils de la seconde catégorie fonctionnent dans le vide, et la lumière y est produite seulement par la chaleur due à la résistance électrique.

254. Lampes à incandescence à l'air libre. — Les lampes de Reynier et de Werdermann, construites sur le principe de l'incandescence avec combustion, se composent d'un petit crayon de charbon venant buter contre une masse assez volumineuse de même matière qui sert à lui amener le courant électrique. Le crayon devient incandescent sur toute sa longueur, ainsi que les points de contact du bloc. Nous nous bornons à indiquer le principe sur lequel reposent ces lampes, sans entrer dans les détails de leur construction, parce qu'elles n'ont reçu aucune application.

255. Lampes à incandescence dans le vide. — Les lampes à incandescence dans le vide utilisent, comme nous venons de le dire, la haute température déterminée dans le conducteur électrique par le passage du courant; mais on évite la combustion de ce conducteur qui se produirait immédiatement à l'air libre, en le plaçant dans un milieu non comburant. Le système à peu près exclusivement adopté à cet effet consiste à l'enfermer dans un petit globe en verre où l'on fait le vide le plus parfait possible.

L'incandescence du filament étant due à la haute température qui résulte du passage du courant, on a intérêt à augmenter le plus possible cette température et, par suite, la résistance électrique du filament à laquelle la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle. Le filament doit donc, tout en étant conducteur du courant, avoir une résistance spécifique élevée et une section très faible.

256. Nature du filament. — Au début, on se servait d'un fil de platine; aujourd'hui on emploie exclusivement le charbon qui présente une résistance 250 fois plus grande, est infusible aux températures très élevées, et possède, à température égale, un pouvoir rayonnant plus considérable.

Le charbon provient le plus souvent de fibres végétales calcinées; la nature de cette fibre et le genre d'opérations auxquelles elle est soumise avant d'être introduite dans la lampe, sont les seuls points qui différencient les nombreux systèmes actuellement proposés et dont nous parlons plus loin.

257. Intensité lumineuse des lampes. — L'intensité lumineuse des lampes à incandescence varie de 1 à 1 000 bougies, suivant la résistance du filament et le nombre d'ampères qui doivent le traverser et, par suite, suivant la différence de potentiel qui existe entre les bornes. Les types les plus répandus sont ceux de 8, de 10, de 16 et de 20 bougies.

L'intensité lumineuse diminue sensiblement à mesure que le nombre d'heures de service de la lampe augmente. M. Fontaine évalue en moyenne cette diminution à 10 p. 100 après une marche de 500 heures; à 15 p. 100 après une marche de 800 heures et à 20 p. 100 après une marche de 1 000 heures. Voici d'ailleurs des

résultats obtenus par M. C. E. Weber avec deux lampes fonctionnant sous une tension de 100 volts :

	Intensité du courant.	Intensité lumineuse.
Après 100 heures de marche.	0,63 ampère.	18,5 bougies.
200 —	0,65 —	18,8 —
300 —	0,65 —	20,7 —
400 —	0,65 —	18,5 —
500 —	0,65 —	18,5 —
600 —	0,65 —	18,5 —
700 —	0,65 —	18,0 —
800 —	0,64 —	17,5 —
900 —	0,64 —	15,5 —
1 000 —	0,64 —	15,2 —
1 100 —	0,64 —	15,2 —
1 200 —	0,64 —	15,2 —
1 300 —	0,64 —	15,2 —
1 400 —	0,64 —	15,2 —
1 500 —	0,63 —	13,7 —
1 600 —	0,63 —	13,7 —

258. Durée des lampes. — La durée des lampes à incandescence peut être évaluée en moyenne à 1 000 heures. Elle dépend d'ailleurs essentiellement du régime auquel elles sont soumises; elle diminue très vite dès qu'on dépasse la différence de potentiel à laquelle elles doivent fonctionner, parce que la désagrégation du filament se produit alors rapidement, et elle augmente au contraire lorsqu'on se tient au-dessous de cette différence de potentiel. C'est ce que montrent les chiffres suivants obtenus à l'usine Edison d'Ivry sur des lampes de 16 bougies, devant fonctionner normalement sous une tension de 100 volts.

Différence de potentiel en volts	95	Durée de la lampe	3 595 heures.
—	96	—	2 751 —
—	97	—	2 135 —
—	98	—	1 645 —
	99	—	1 277 —
	100	—	1 000 —
	101	—	785 —
	102	—	601 —
	103	—	477 —
	104	—	375 —
	105	—	284 —

La différence de potentiel à laquelle fonctionnent les lampes, a

comme on le voit, une très grande influence sur la durée des filaments.

Comme les frais de renouvellement des lampes entrent pour une part assez importante dans les dépenses de l'éclairage à incandescence, on ne doit pas en général, au point de vue économique, dépasser la différence de potentiel indiquée par les constructeurs. Cependant, lorsque la force motrice coûte cher, on peut avoir intérêt à augmenter cette différence de potentiel au détriment de la durée des lampes; car, avec quelques volts de plus, c'est-à-dire avec une très faible augmentation de l'énergie dépensée, on arrive à obtenir une intensité lumineuse beaucoup plus grande. C'est à l'industriel de voir lequel de ces deux facteurs a pour lui le plus d'importance, la durée des lampes ou la dépense de force motrice.

Il existe un très grand nombre de lampes établies d'après les principes que nous venons d'exposer; elles ne diffèrent que par quelques détails d'exécution et surtout par la composition du filament. Nous allons passer en revue celles qui sont le plus employées aujourd'hui.

DESCRIPTION DES LAMPES A INCANDESCENCE

259. Lampe Edison. — C'est à Edison qu'est due la première lampe à incandescence ayant donné des résultats pratiques satisfaisants et c'est à lui que revient réellement l'honneur de cette invention.

Il emploie un filament très mince de bambou du Japon carbonisé, dont la fabrication est très délicate et exige des précautions toutes particulières. Les fibres sont découpées dans de petites lames provenant de la surface de la plante. Quand on leur a donné les dimensions voulues, on les met dans des moules plats en matière réfractaire, dans lesquels on les recourbe en U (fig. 165). Les moules une fois fermés sont entassés dans des moufles à fermeture hermétique, que l'on achève de remplir avec de la plombagine, pour empêcher le contact de l'air. Les moufles sont placés dans une étuve où on les chauffe assez longtemps à une température

élevée. Après les avoir laissé refroidir très lentement, on défait les moules, et l'on en retire des filaments de carbone très flexibles et jouissant en même temps d'une grande solidité.

Ce conducteur présente à ses extrémités deux petits renflements, sur lesquels on fait la jonction avec des fils de platine qui doivent lui amener le courant; ces fils sont contenus dans un petit tube fermé au fond duquel ils sont scellés. Pour consolider leur jonction avec les filaments de carbone, et pour assurer la communication électrique, les contacts sont soumis à un bain galvanoplastique de sulfate de cuivre : on établit ainsi, par une couche de cuivre mince et continue, une liaison parfaite entre le circuit extérieur et les extrémités du filament de carbone.

Fig. 165.

Après cette opération, le tube est introduit dans une ampoule en verre, avec laquelle il est soudé et qui sert d'enveloppe à la lampe. On fait le vide dans cette ampoule au moyen d'une pompe à mercure de Sprengel. Cet appareil permet d'obtenir un vide presque parfait et même d'éliminer les molécules de gaz qui sont retenues dans les pores du charbon.

Pour cela, il suffit, lorsqu'on a déjà obtenu un certain degré de vide, de porter le filament à l'incandescence, en ayant soin d'envoyer d'abord un courant de faible intensité qu'on augmente peu à peu à mesure que le vide devient plus complet; cette opération exige beaucoup de soin pour ne pas altérer le charbon.

Enfin la lampe est soudée au chalumeau et lutée avec du plâtre dans un manchon de cuivre, fileté extérieurement et mis en contact avec un des fils de platine, qui constitue le support. Une petite rondelle, également en cuivre, est scellée au milieu du plâtre à la base de la lampe et communique avec l'autre fil de platine.

Pour mettre la lampe en place dans une installation, on visse le manchon dans une douille en bois présentant deux pièces de cuivre qui viennent faire respectivement contact avec le manchon

et la rondelle, et auxquelles aboutissent les deux conducteurs amenant le courant à l'appareil.

Une fois les lampes fabriquées, on procède à leur essai et à leur classement. En effet des filaments de charbon, qui paraissent semblables et qui ont été faits de la même manière, n'opposent pas tous une résistance égale au courant. Il est indispensable, pour les raisons indiquées plus haut, qu'avant de sortir de l'atelier, chaque lampe soit soumise à une expérience ayant pour but de déterminer la résistance à chaud et à froid (c'est-à-dire lorsqu'elle est ou non traversée par le courant), et la différence de potentiel sous laquelle elle doit fonctionner pour donner son intensité lumineuse normale.

Pour les lampes Edison, il existe plusieurs séries de types résumées dans le tableau suivant.

Ces lampes, dont la durée moyenne est de 1 000 heures, consomment environ 4,5 watts par bougie. La compagnie Edison en fabrique en outre de 10, 20 et 30 bougies, qui donnent une bougie pour 3,5 watts; mais cette augmentation de rendement n'est obtenue qu'au détriment de la durée, de telle sorte qu'il est plus sage en général de se servir des anciens types.

DÉSIGNATION des LAMPES	INTENSITÉ lumineuse en bougies.	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes en volts.	INTENSITÉ approximative en ampères.	RÉSISTANCE à chaud en ohms.	NOMBRE DE LAMPES par cheval fourni à la machine.
A	32	90 à 115	1,20	66,6	4
A^{16}	16	90 à 110	0,75	135	8
A^{10}	10	90 à 110	0,55	181,8	10,8
B^{8}	8	45 à 55	0,75	62,5	8,16
A C^{16}	12 à 16	23 à 28	1,60	15,7	14,8
B^{20}		45 à 55	1,20	45,4	10,8
B^{10}		45 à 55	0,60	83,3	20

La compagnie Edison construit en outre, comme la plupart des fabricants dont nous parlons ci-dessous, des lampes à très grande intensité, dites *Sunbeam,* pouvant remplacer un foyer à arc, mais la durée de ces lampes qui atteint à peine 400 heures et surtout

les difficultés de la fabrication en ont jusqu'à présent empêché les applications.

260. Lampe Swan. — Le filament de la lampe Swan (fig. 166) est formé par une tresse en coton carbonisé de 10 centimètres environ de longueur; il porte à chacun de ses bouts un renflement, qui sert à établir la liaison avec le circuit, et qui est enroulé de façon à former une spire.

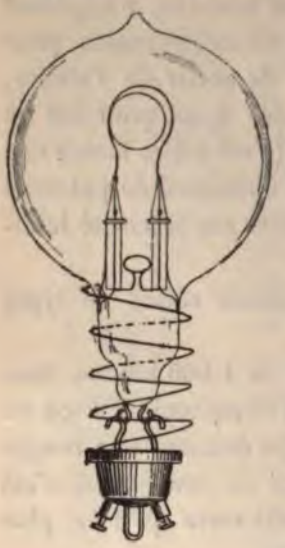


Fig. 166.

Pour donner aux fils de coton une certaine élasticité, on les plonge dans un mélange formé de deux parties d'acide sulfurique pour une partie d'eau. Ce bain a la propriété de parcheminer le tissu végétal. Une fois soumis à ce traitement, le filament est placé dans un vase en terre, qu'on remplit de poussière de charbon et que l'on soumet au rouge blanc, après l'avoir fermé hermétiquement.

Afin d'éviter les rentrées d'air dans le globe de verre, par suite des différences de dilatation aux points de soudure des conducteurs en platine, on les recouvre de verre sur presque toute leur longueur, et ces petits tubes soudés au globe sont maintenus par une traverse en verre. Le reste de l'opération est semblable à ce que nous avons déjà dit pour le procédé Edison. On fait le vide dans l'ampoule de verre avec une pompe de Sprengel, et l'on a soin de porter les filaments de charbon à l'incandescence pendant ce temps, pour chasser les gaz qu'ils contiennent.

Les fils de platine se terminent au dehors de l'ampoule par deux petits anneaux dans lesquels on engage les deux crochets du support de la lampe, qui sont isolés l'un de l'autre et respectivement réunis aux conducteurs électriques. Ce genre de support est simple et peu coûteux, mais il présente deux inconvénients : le contact entre les crochets et les anneaux n'est pas toujours très bon, bien qu'il soit assuré par un ressort à boudin s'appuyant

d'une part sur l'ampoule de verre, d'autre part sur le support, et les fils de platine se trouvent soumis à une tension qui compromet leur solidité.

TYPES	POUVOIR éclairant en bougies.	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes en volts.	INTENSITÉ approximative en ampères.	RÉSISTANCE à chaud. en ohms.	NOMBRE DE LAMPES par cheval fourni à la machine.
A. . . .	10	100	0,40	250	15
Id . .	10	50	0,80	63	15
Id . .	10	25	1,60	16	15
Id . .	16	100	0,64	156	9,5
Id . .	16	65	0,98	66	9,5
Id . .	16	50	1,28	39	9,5
Id . .	32	100	1,28	78	5
Id . .	32	50	2,56	20	5
Id . .	50	100	2,00	50	3
Id . .	50	50	4,00	13	3
B. . . .	10	100	0,30	333	20
Id . .	10	50	0,60	83	20
Id . .	10	25	1,20	21	20
Id . .	16	100	0,48	208	12,5
Id . .	16	65	0,74	88	12,5
Id . .	16	50	0,96	52	12,5
Id . .	32	100	0,96	104	6,25
Id . .	32	50	1,92	26	6,25
Id . .	50	100	1,50	67	4
Id . .	50	50	3,00	17	4

Les principaux types de lampes Swan sont ceux du tableau ci-dessus. Les lampes du type B dépensent 3 watts par bougie, tandis que celles du type A en exigent 4 ; mais cette économie n'est réalisée qu'aux dépens de la durée.

Les deux lampes dont nous venons de parler remontent au début des applications de la lumière à incandescence, elles sont encore très employées. Nous allons maintenant passer en revue les lampes d'invention plus récente qui paraissent répondre le mieux aux besoins de l'industrie.

261. Lampe Weston. — Les lampes Weston, fabriquées par la Société américaine Maxim-Weston et fort employées aux États-Unis, renferment un filament fait d'une substance appelée *tamidine* par l'inventeur et préparée de la manière suivante :

On traite du papier par un mélange d'acide sulfurique et d'acide azotique, de façon à obtenir un fulmi-coton assez épais. On dissout ce produit et l'on fait évaporer jusqu'à ce que la masse soit solide. On le coupe alors en feuilles très minces, d'une épaisseur de 0,15 millimètre. Ces feuilles sont plongées dans un bain d'ammoniaque pendant une heure environ, puis soigneusement lavées et séchées.

Dans cet état, elles sont transparentes, flexibles, très résistantes et ont toutes les propriétés de la cellulose. On découpe alors le filament à l'emporte-pièce et on le soumet dans un moufle à une température très élevée. On obtient ainsi un charbon dur, très flexible, très homogène et ayant une grande résistance électrique.

Le filament présente à ses extrémités deux renflements auxquels on fixe les fils de platine au moyen de petits boulons; les fils de platine sont introduits dans un culot en verre qui se soude à l'ampoule pour fermer sa partie inférieure.

On fait ensuite le vide dans l'ampoule, en ayant soin de porter le filament à l'incandescence, à la fin de l'opération, afin de chasser les gaz et l'humidité contenus dans les pores du charbon.

Les lampes Weston sont fabriquées sur différents types donnant de 16 à 600 bougies; elles sont employées à New-York pour l'éclairage des rues et fournissent une intensité lumineuse de 125 bougies avec 2,3 ampères et 160 volts, ce qui correspond à 3 watts environ par bougie.

262. Lampe Woodhouse et Rawson. — Parmi les nouveaux foyers à incandescence, il faut encore citer la lampe Woodhouse et Rawson, dont les applications sont assez nombreuses, surtout en Angleterre.

La principale qualité de cette lampe est l'élévation de son rendement; elle n'exige en effet que 2,5 watts par bougie pour les filaments à forte résistance.

Cette propriété résulte de la fabrication du filament. On obtient celui-ci par un dépôt de charbon qui possède une grande dureté, une pureté absolue et une homogénéité complète, tout en conservant sa flexibilité suffisante. Le procédé est tenu secret : le filament

est en forme de ruban ; il est constitué, dit-on, avec du coton, et renforcé par le dépôt d'un hydrocarbure décomposé par le courant.

Quant à la durée de la lampe, les inventeurs garantissent qu'elle est de 1 000 heures ; nous croyons que ce chiffre est exagéré et que, comme pour toutes les lampes prenant seulement 2,5 à 3 watts par bougie, la durée moyenne ne dépasse guère 600 heures.

263. Lampe A. Gérard. — Dans la lampe A. Gérard, le filament ne provient ni d'une fibre végétale, ni d'un fragment de carton carbonisé ; il est fait de coke soigneusement trié et réduit en poudre très fine ; cette poudre de charbon est ensuite mélangée avec des matières gommeuses, de manière à former une pâte qui est fortement comprimée, passée à la filière, et enfin soumise à un traitement spécial destiné à lui communiquer de l'élasticité. Les procédés de fabrication qui sont tenus secrets, donnent au filament une homogénéité parfaite et assurent le bon fonctionnement de la lampe. De plus, au lieu d'être courbé comme dans les modèles précédents, le filament se compose de deux fragments disposés en forme de triangle (fig. 167) et soudés à leur partie supérieure par une petite goutte de pâte de charbon.

Les lampes Gérard sont en outre soumises à une opération qui tend d'ailleurs à se généraliser et qu'on appelle le *nourrissage*, opération ayant pour but de renforcer le filament aux points où il est le plus faible. A cet effet chaque filament, avant d'être introduit dans l'ampoule, est placé dans un bain d'huile de pétrole et porté à l'incandescence sous l'action d'un courant électrique. Celui-ci échauffe le filament précisément aux points où son diamètre est le plus faible et décompose le pétrole en déterminant des dépôts de charbon sur le filament.

Fig. 167.

Le caractère distinctif des lampes Gérard est de n'exiger qu'une force électromotrice assez faible, comme le montre le tableau ci-dessous qui donne les différents types existants.

Nous devons ajouter qu'on construit également des appareils plus puissants, allant jusqu'à 800 et 1 000 bougies, mais ce ne sont guère que des curiosités scientifiques et nous n'avons pas à nous en occuper.

La faible force électromotrice exigée est une qualité pour les éclairages domestiques, où l'on emploie le plus souvent des piles,

TYPES	POUVOIR éclairant en bougies	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes en volts.	INTENSITÉ approximative en ampères.	RÉSISTANCE à chaud en ohms.	ÉNERGIE électrique absorbée par lampe en Watts.	NOMBRE de lampes par cheval fourni à la machine.
00	8	7	2,1	8,1	36	16
0	16	20	2,2	9,1	44	13,5
1	20	25	2,3	11,0	58	10,5
2	32	33	2,5	13,2	83	7

car elle permet de diminuer le nombre d'éléments. Il n'en est plus de même dans une installation industrielle, et les lampes Gérard y seraient peu avantageuses si l'on employait le montage en dérivation adopté avec les autres lampes, car on serait forcé de prendre des conducteurs beaucoup trop gros. Aussi opère-t-on d'une manière différente : on divise les lampes de l'installation en un certain nombre de groupes dans chacun desquels elles sont réunies en quantité, et ces groupes sont eux-mêmes reliés en tension. On arrive ainsi, en prenant sur la machine une plus grande force électromotrice, à diminuer l'intensité totale du courant, et les diamètres des fils conducteurs peuvent être les mêmes que dans les autres systèmes d'éclairage.

264. Lampes à incandescence à faible résistance. — A côté des lampes à incandescence que nous venons d'étudier et qui, à l'exception de la lampe Gérard tenant le milieu entre les deux systèmes, présentent toutes une résistance électrique relativement élevée, il existe d'autres appareils fondés au contraire sur l'adoption de faibles résistances. Les principales lampes de ce genre, dont nous discuterons plus loin les qualités, à propos des modes de groupe-

ment des foyers lumineux, sont les lampes Bernstein et Siemens. Elles sont destinées à être placées en série.

265. Lampe Bernstein. — Le filament de la lampe Bernstein (fig. 168) est un charbon rectiligne très dense, obtenu d'une manière fort originale par la décomposition d'un carbure d'hydrogène. On prend un vase rempli de vapeurs carburées, au fond duquel est une pièce de cuivre reliée au pôle négatif d'une dynamo. Sur cette pièce, mais pouvant en être éloigné, est placé un fil relié au pôle positif. On ferme le circuit et on éloigne très légèrement le fil de la pièce de cuivre ; un petit arc électrique prend naissance, les vapeurs de carbure sont décomposées, et il se forme à la pointe du fil un dépôt de charbon dont on augmente la longueur en éloignant progressivement le fil de cuivre. Le diamètre du filament ainsi obtenu varie suivant la vitesse de déplacement du fil.

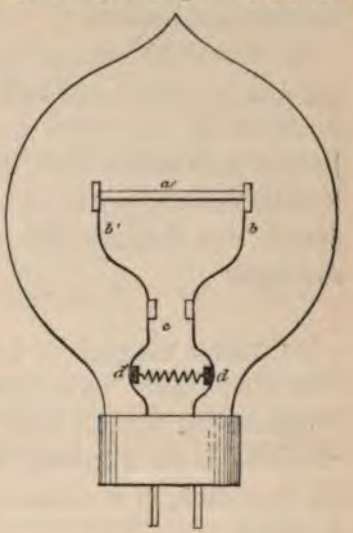


Fig. 168.

Le charbon *a* est fixé aux extrémités de deux conducteurs *b*, *b'*, disposés de manière à se rapprocher l'un de l'autre au point *c* ; en *d*, *d'*, sont des douilles en matière isolante réunies par un ressort à boudin. Si le charbon *a* se détruit, le ressort rapproche les deux conducteurs qui viennent se toucher en *c* et ferment le circuit. De cette façon, on peut placer les lampes en série ; l'extinction de l'une n'entraîne pas l'arrêt des autres. Afin qu'on ne produise pas une interruption dans le circuit en série quand on retire une lampe de son support, celui-ci est disposé de telle sorte que, pour retirer la lampe, on doit établir un court-circuit dans le support, et ce contact ne peut être supprimé tant que la lampe n'est pas en place. La disposition en série est, comme nous le verrons, plus économique que celle en dérivation.

Les lampes Bernstein fabriquées aux Etats-Unis fonctionnent

avec une différence de potentiel variant de 7 à 14 volts, suivant que les foyers sont de 18 à 50 bougies; elles exigent une intensité de 10 ampères et dépensent par suite entre 4 et 2,8 watts par bougie. Au point de vue de la durée, elles donnent des résultats très satisfaisants.

M. Bernstein fabrique sous le nom de *lampe merveilleuse* un appareil à grande intensité qu'on peut disposer en dérivation. Avec un de ces foyers on peut remplacer un groupe de petites lampes à incandescence, ce qui réduit la dépense d'installation. Substituées aux petits régulateurs à arc, elles ont l'avantage de donner une lumière plus fixe et d'éviter le remplacement des charbons.

266. Lampe Siemens. — La nature du filament de cette lampe n'est pas connue ; on sait seulement que, pendant la fabrication, l'ampoule est remplie d'un carbure d'hydrogène. Le filament est en forme de fer à cheval ; ses extrémités sont soudées aux deux fils de platine, et le contact est assuré par un dépôt électrolytique de nickel.

Les lampes Siemens fonctionnent avec 11 ampères ; elles sont construites sur deux types différents : l'un de 50 bougies avec 10 volts de différence de potentiel aux bornes, l'autre de 100 bougies avec 20 volts. Elles produisent donc une bougie pour 2,2 watts. Quant à leur durée, elle peut être évaluée à environ 800 heures.

Les lampes étudiées dans les paragraphes précédents sont loin d'être les seules qui s'offrent aujourd'hui au choix de l'industriel, mais elles sont de beaucoup les plus appliquées, et c'est pour cette raison que nous les avons décrites.

Nous devons ajouter que nous avons seulement parlé des lampes d'une intensité moyenne, entre 8 et 50 bougies. En réalité, on en fabrique au-dessous et au-dessus de cette limite ; les premières ne servent que dans les petits éclairages; les deuxièmes sont encore soumises aux essais de laboratoire. Elles ne rentrent donc, ni les unes ni les autres, dans notre programme, et nous ne pouvons que les indiquer en passant.

CHAPITRE II

INSTALLATION DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

267. Avantages de la lumière électrique. — La lumière électrique tient aujourd'hui une place importante dans l'industrie, et ses applications, déjà nombreuses, ne peuvent que se répandre de plus en plus.

Quand on en était réduit à produire l'électricité avec la pile, la lumière électrique ne pouvait servir que dans quelques cas tout à fait particuliers, tels que l'éclairage des phares, les signaux, la production de certains effets de théâtre. Mais maintenant, grâce à l'invention des machines dynamos, chaque industriel disposant d'une force motrice peut éclairer ses ateliers à peu de frais, et souvent même un commerçant a avantage à créer une force motrice exprès pour l'éclairage de ses magasins. Les régulateurs différentiels, les bougies Jablochkoff, les lampes à incandescence ont permis de diviser la lumière et de la répartir de toutes les façons possibles. Enfin les stations centrales sont venues permettre de distribuer l'électricité comme le gaz, et l'ont mise par suite à la disposition de toutes les personnes qui ne pouvaient songer à installer des machines dans leurs habitations.

D'un autre côté, il existe beaucoup de cas où le gaz présente de grands inconvénients. Dans les théâtres, dans les grands magasins, dans certains ateliers comme les distilleries, les fabriques de produits chimiques, les filatures, les moulins, etc., il constitue un danger permanent. Il occasionne une élévation de température

qui, dans les espaces restreints, peut devenir insupportable. Il nécessite un renouvellement d'air considérable : ainsi, l'on peut compter qu'un mètre cube de gaz, en brûlant, vicie 23 mètres cubes d'air par la transformation de l'oxygène en acide carbonique. Il dégage des vapeurs sulfureuses qui altèrent les peintures. Enfin, sa lumière dénature les effets des couleurs, tous défauts que l'on ne retrouve pas avec la lumière électrique.

Dans certains cas, l'électricité s'impose, par exemple, pour l'éclairage des navires et des mines. L'emploi de l'huile est alors fort onéreux et expose à des dangers contre lesquels on ne saurait prendre trop de précautions. Les navires actuels ayant à leur disposition des machines susceptibles de produire 3 000 à 4 000 chevaux, il n'y a pas grand inconvénient à en distraire quelques-uns pour actionner une dynamo. On évite ainsi les chances d'incendie, on maintient la température à un degré supportable et l'on réalise une économie très notable sur le prix de l'éclairage à l'huile.

268. Choix des lampes suivant les applications. — Les mêmes appareils ne peuvent pas être employés indifféremment pour tous les cas qui se présentent et, en dehors des considérations économiques, chaque système ne convient que pour certaines applications déterminées.

Quand on cherche un foyer lumineux unique d'une grande intensité, pour l'éclairage des phares, pour les signaux de guerre, il faut avoir recours aux régulateurs électriques. On peut obtenir de cette façon une intensité de 2 000 carcels concentrée en un seul point, et en adoptant le réflecteur du colonel Mangin, on projette cette lumière à une grande distance. En disposant sur un chariot une chaudière qui porte un moteur Brotherood attelé directement à une machine électrique, on a un foyer lumineux susceptible d'être déplacé sans difficulté, et par suite, d'être employé à la guerre. Le système des régulateurs est encore utile dans les théâtres, quand il s'agit de projeter une vive lumière sur un point de la scène. Pour ces différentes applications, on peut employer les régulateurs monophotes en plaçant un seul foyer par circuit.

Quand on doit, au contraire, diviser la lumière, il faut recourir, comme nous l'avons déjà vu, aux régulateurs, aux bougies et aux lampes à incandescence.

Avec les régulateurs, on obtient des foyers dont l'intensité varie depuis 40 jusqu'à 500 carcels ; il suffit de régler en conséquence la distance des charbons et leur diamètre. Ils conviennent pour les grands espaces distribués d'une façon uniforme, les halles de chemin de fer, les chantiers de construction.

Pour un local assez divisé, la bougie Jablochkoff est préférable, parce qu'elle donne seulement une lumière de 30 carcels et permet d'employer un plus grand nombre de foyers qu'on peut répartir suivant les besoins. Il existe, en outre, beaucoup d'ateliers où l'atmosphère est chargée de poussières ou de gaz délétères, et dans lesquels le mécanisme toujours un peu compliqué d'un régulateur serait vite hors d'état de manœuvrer. La bougie naturellement trouve là sa place. La simplicité de sa construction en fait un appareil très commode dans la plupart des industries. Mais, comme nous l'avons dit plus haut, il ne faut pas demander à la lumière qu'elle produit une fixité absolue.

Ce sont les lampes à incandescence qui réalisent le mieux la division de la lumière. Le modèle le plus couramment employé donne une intensité lumineuse de 16 bougies ; cependant nous avons vu qu'on en construit aussi de plus fortes. Enfin, pour l'éclairage des maisons particulières, on se sert ordinairement de foyers plus faibles. Ces lampes sont applicables partout où le gaz est employé : éclairage des appartements, des magasins, des bureaux, des ateliers, des filatures, des théâtres, etc...

Dans bien des circonstances, on ne se borne pas à employer seulement un des systèmes d'éclairage énoncés ci-dessus, mais on les combine ensemble. C'est ainsi que, dans un théâtre, par exemple, on emploiera les lampes à incandescence pour la rampe, les herses, les lustres ; dans les couloirs on disposera des lampes à incandescence ; sur la scène on se servira de régulateurs ; dans le foyer et à la porte de bougies Jablochkoff.

A bord des navires, on emploie les régulateurs munis du projecteur Mangin pour produire la lumière nécessaire aux manœuvres. Les signaux se font au moyen de lampes à incandescence que l'on

hisse le long des mâts et des vergues. Enfin l'éclairage intérieur est fourni par des lampes à incandescence.

269. Distribution de la lumière. — Nous empruntons les chiffres suivants à M. Hospitalier *(Formulaire pratique de l'électricien)* :

Pour les cours d'usines, les places, les gares non couvertes, on obtient de bons résultats avec des foyers à arc de 15 ampères placés à 12 mètres de hauteur.

Pour l'éclairage de gares où on ne fait aucun travail, ou de chantiers de terrassement, on admet généralement :

Lampes à arc de	10 ampères	hauteur de	10 mètres.
—	13 —	—	15 à 16 —
—	15 —	—	18 —
—	18 —	—	20 —

Quand dans l'espace en question on fait un certain travail, il faut diminuer la hauteur de 2 mètres environ.

Dans un intérieur, chambre, salon, etc., on obtient un éclairage suffisant par la règle suivante : Disposer des lampes à incandescence de 8 à 10 bougies, et calculer leur nombre de telle façon que la quantité de lumière totale qu'elles produisent exprimée en bougies décimales (0,1 bec Carcel) représente la moitié du volume de la chambre exprimé en mètres cubes.

Exemple. — Soit une chambre ayant 40 mètres carrés de surface avec une hauteur de 3 mètres, elle a 120 mètres cubes de volume; la quantité de lumière fournie devra être de 60 bougies ; on pourra adopter 8 lampes de 8 bougies.

On peut encore se régler d'après la surface, en admettant 1 à 2 bougies décimales par mètre carré pour un éclairage moyen. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, la chambre ayant une surface de 40 mètres carrés, si l'on admet 1,5 bougie par mètre carré, on devra employer 60 bougies.

Pour l'éclairage des ateliers, on ne peut adopter aucune règle fixe ; car chaque machine, chaque outil exige un éclairage particulier. La lumière ne peut, par exemple, être distribuée dans une fonderie comme dans une filature. Chaque cas demande une étude spéciale, d'autant plus que la disposition des locaux est elle-même très variable.

270. Montage des foyers électriques. — Ces considérations nous amènent naturellement à étudier les différentes manières dont on peut monter en circuit les foyers électriques ; elles se divisent en trois groupes principaux, suivant que l'installation comprend ou des régulateurs, ou des lampes à incandescence, ou enfin ces deux systèmes à la fois.

Quand à l'éclairage par bougies Jablochkoff, nous n'avons rien de particulier à en dire, puisque nous avons indiqué le mode de montage de ces appareils. Lorsque les bougies doivent être employées concurremment avec des lampes à incandescence, on doit alimenter les deux systèmes de foyers par des machines différentes.

271. Montage des régulateurs. — Les régulateurs peuvent être placés soit en série, soit en dérivation, soit enfin suivant une combinaison de ces deux systèmes.

1° Le montage en série, dans lequel tous les régulateurs sont

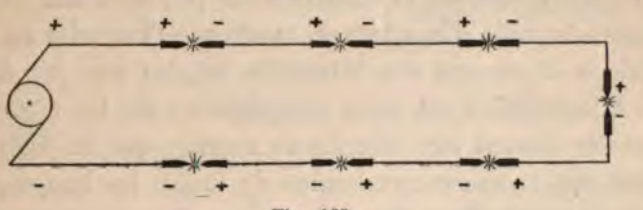


Fig. 169.

placés sur le même conducteur à la suite des uns des autres (fig. 169), présente une très grande simplicité d'installation, puisqu'il n'y a qu'un seul circuit. La différence de potentiel aux bornes de la machine est égale à la somme des différences de potentiel exigées par chaque régulateur, abstraction faite de la perte due aux conducteurs ; elle est donc assez élevée. Quant à l'intensité du courant, elle a pour valeur celle d'un seul régulateur et varie entre 6 et 19 ampères, suivant les foyers employés, de telle sorte que le diamètre du conducteur peut être relativement faible.

Ce système est donc économique ; mais il a l'inconvénient que toutes les lampes sont solidaires et que l'extinction de l'une entraîne celle des autres, si les régulateurs ne sont pas munis de dispositifs qui les mettent hors de circuit dès qu'il leur arrive un accident. Ces dispositifs existent d'ailleurs dans la plupart des appa-

reils, notamment dans les foyers Brush, Piette et Krizik et Thomson-Rice.

Le plus souvent, les régulateurs sont montés en série lorsqu'ils ne sont pas combinés à des lampes à incandescence. Quant aux bougies Jablochkoff, elles sont toujours réunies de cette manière, ainsi que nous l'avons dit plus haut.

2° Dans le système en dérivation proprement dit (fig. 170), deux

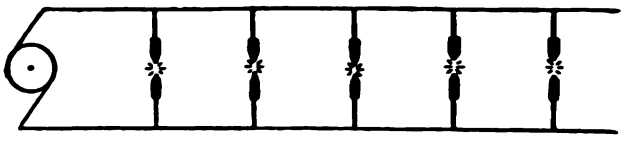


Fig. 170.

fils parallèles, partant de la dynamo, vont jusqu'à l'extrémité des locaux à éclairer, et c'est sur eux que sont branchés les fils des régulateurs. Ces fils sont dits conducteurs principaux. Contrairement au cas précédent, la différence de potentiel aux bornes de la dynamo est celle d'une lampe, tandis que l'intensité du courant est égale à la somme des intensités exigées par les différents foyers. L'installation est assez compliquée ; car les diamètres de tous les fils doivent être calculés de manière que la différence de potentiel soit la même aux bornes de toutes les lampes, quelles que soient les positions respectives de celles-ci par rapport à la dynamo. Par contre, les foyers sont indépendants et l'on peut en éteindre un nombre quelconque sans troubler le fonctionnement des autres.

Une autre disposition en dérivation consiste à mettre chaque

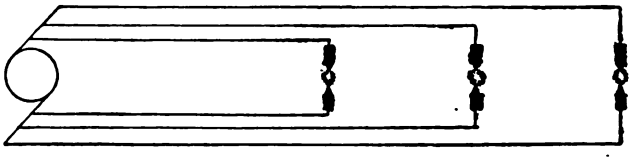


Fig. 171.

régulateur sur un circuit spécial aboutissant aux bornes de la dynamo (fig. 171). La différence de potentiel et l'intensité ont les mêmes valeurs que précédemment.

On augmente ainsi la dépense de conducteurs, mais on assure

l'indépendance absolue des foyers. Dans ce cas, on ajoute à chaque circuit un rhéostat destiné à compenser les différences de résistance, ainsi que nous l'avons expliqué à propos du régulateur Cance.

3° Le montage mixte ou en séries multiples (fig. 172) présente à la fois les avantages et les défauts des deux systèmes précédents.

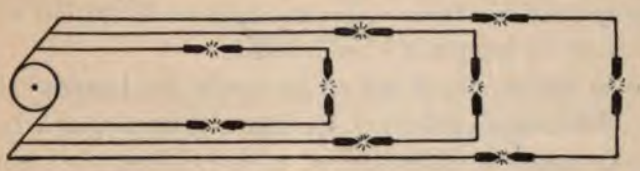


Fig. 172.

La différence de potentiel est égale à la somme des différences de potentiel exigées par les appareils d'un même circuit, et l'intensité totale à la somme des intensités de chaque circuit.

Ce système exige des conducteurs de moins gros diamètre que le système en dérivation ; mais les foyers de chaque circuit sont solidaires et, si l'un vient à s'éteindre, il doit être remplacé par une résistance pour que les autres régulateurs du même circuit n'aient pas à souffrir de sa disparition.

Lorsqu'on éteint une lampe dans un des deux premiers systèmes de montage, ou lorsqu'on ouvre un circuit dérivé dans le troisième, les foyers retranchés doivent être remplacés par une résistance équivalente, sans quoi la différence de potentiel aux bornes de la dynamo ou l'intensité du courant est plus considérable que celle du régime normal. Mais, en agissant ainsi, on perd inutilement toute l'énergie électrique absorbée par cette résistance ; aussi préfère-t-on généralement faire varier la production de la dynamo soit à la main, soit automatiquement. Nous verrons les procédés adoptés à cet effet en étudiant les systèmes de distribution de l'électricité.

272. Montage des lampes à incandescence. — Tout ce que nous venons de dire pour les régulateurs peut se répéter pour les lampes à incandescence, avec cette observation que le montage en série est réservé aux lampes à faible résistance (Bernstein et Siemens),

tandis que pour les lampes à résistance élevée, on adopte soit le montage en dérivation, soit le montage mixte, suivant que la force électromotrice de la dynamo est égale à la différence de potentiel aux bornes d'une lampe, ou au double, triple, quadruple, etc., de cette différence de potentiel.

Montage en dérivation. — Le montage en dérivation est le plus adopté pour les lampes à incandescence.

Dans le même circuit on ne place que des lampes exigeant la même différence de potentiel. Si l'on doit employer à la fois des lampes de tensions différentes *a*, *a*, *b*, *b*, telles, par exemple, que

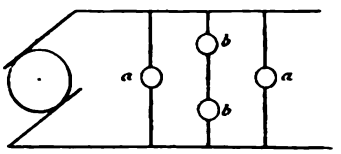


Fig. 173.

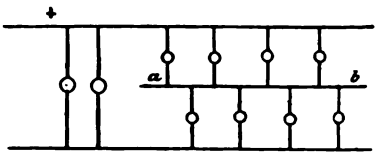


Fig. 174.

a exige une tension double de *b*, on les monte comme l'indique la figure 173. Avec cette manière de procéder, quand on met une lampe hors circuit, la seconde placée sur la même dérivation s'éteint aussi.

Lorsqu'on a une grande quantité de lampes disposées de cette façon, on peut les réunir par un conducteur *a b* (fig. 174). Par ce procédé, l'extinction d'une lampe n'entraîne pas absolument celle des autres. Mais on ne doit pas éteindre plus d'une lampe sur dix, sans quoi celles qui se trouvent du même côté par rapport au conducteur *a b* que les lampes éteintes sont soumises à un courant d'une intensité plus forte et peuvent se trouver endommagées.

Montage en boucle. — Dans le montage en dérivation, les lampes placées à l'extrémité des conducteurs possèdent une tension moindre que celles qui sont à l'origine, à cause de la résistance du circuit. On évite cet inconvénient au moyen de la disposition *en boucle* (fig. 175), dans laquelle la longueur totale des conducteurs principaux est la même pour chaque dérivation.

Ce système complique l'installation et augmente la dépense en

fil; mais ce défaut est compensé par le bon fonctionnement de l'éclairage résultant de l'égalité de résistance des divers circuits.

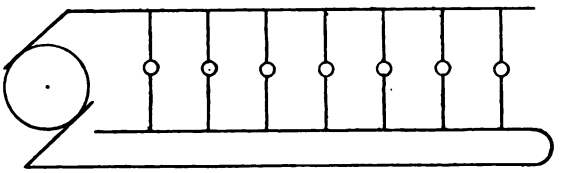


Fig. 175.

Pour calculer la section du conducteur dans ce montage, il faut supposer toutes les lampes à l'extrémité du circuit.

Montage en ceinture. — La figure 176 montre une disposition adoptée dans quelques cas particuliers, quand, par exemple, il

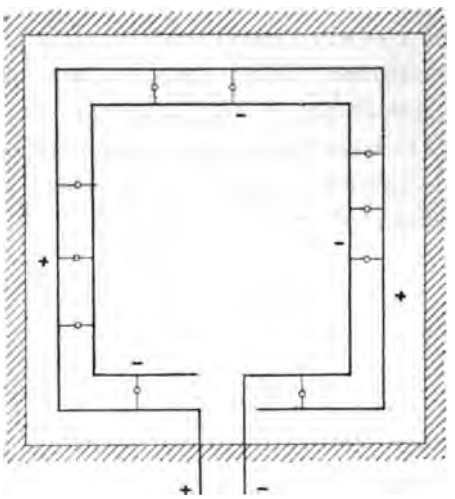


Fig. 176.

s'agit d'éclairer les côtés d'une salle, d'un théâtre. C'est ce qu'on appelle le *montage en ceinture*. Il présente l'avantage de mettre toutes les lampes exactement à la même distance des bornes du circuit. Ainsi, dans une salle où l'on devra disposer des lampes sur les quatres côtés, le circuit en ceinture assurera à toutes les lampes le même potentiel.

La section du conducteur sur le circuit en ceinture se calcule sur *la moitié de la longueur*.

Montage à trois fils d'Edison. — Dans ce système, au moyen duquel Edison est arrivé à réduire le poids des conducteurs, on réunit en tension deux dynamos M_1, M_2. Le circuit est formé de deux conducteurs *a a*, *b b*, et d'un troisième *c c*, dit *de compensation,* partant du point de jonction des machines. Les lampes sont placées en dérivation, comme l'indique la figure 177.

Quand le nombre des lampes allumées entre *a a* et *c c* est le

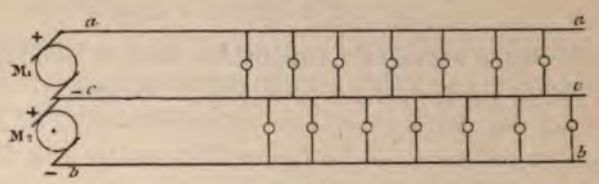


Fig. 177.

même qu'entre *b b* et *c c*, aucun courant ne traverse le fil de compensation. Au contraire, si l'un des circuits a, par exemple, dix lampes de plus que l'autre, *c c* est parcouru par un courant dont l'intensité est dix fois celle d'une lampe seule. Dans la pratique, on doit, au point de vue économique, éviter autant que possible que cette circonstance se présente.

La disposition à trois fils n'est pas autre chose que la juxtaposition de deux circuits distincts sur chacun desquels les lampes seraient montées en dérivation. Aussi offre-t-elle les avantages de ce dernier montage, en ce sens que les lampes sont indépendantes les unes des autres. Mais elle permet en outre de réaliser une grande économie de fil par suite de la substitution du fil *c c* (de faible diamètre puisqu'il n'est jamais parcouru par le courant total d'une machine) aux deux fils égaux à *a a* et *b b* qu'il faudrait employer si les deux dynamos avaient leurs circuits distincts.

Distribution à trois fils par câbles équilibrés. — La figure 178 représente ce système de distribution. Il est employé à Paris par la Compagnie Edison pour le secteur électrique comprenant les boulevards entre l'Opéra et le faubourg Saint-Martin. C'est le système à trois conducteurs dont il a été question précédemment, avec cette différence que les conducteurs de distribution vont en diminuant d'un côté et en augmentant de l'autre, de manière que la section

totale soit toujours la même partout. Par ce procédé la tension est constante en tous points au moins pour la distribution moyenne des lampes correspondant aux sections calculées en chaque point.

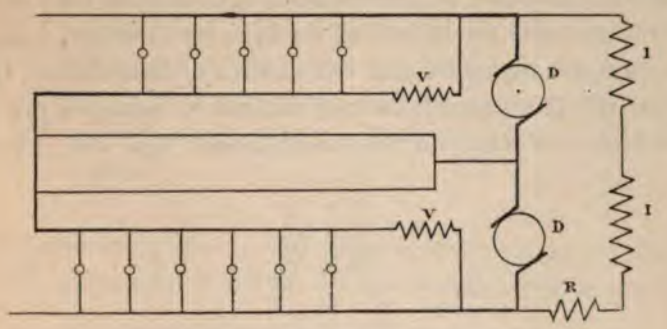


Fig. 178.

Les inducteurs I, I sont groupés deux à deux en tension et chaque circuit excitateur porte une résistance variable R; on peut

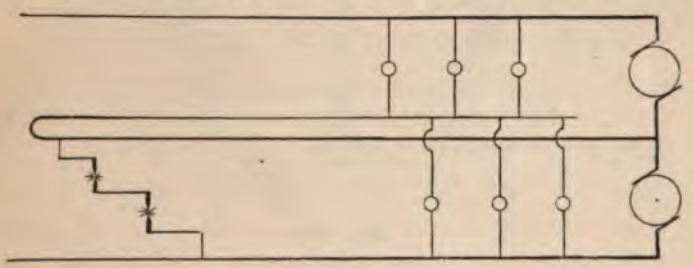


Fig. 179.

insérer une résistance V dans le circuit extérieur. Comme on le voit, le fil neutre est double. Cette disposition a été adoptée pour faciliter la pose.

Ce système peut être simplifié comme l'indique la figure 179, ce qui le rend plus économique.

Distribution par feeders. — Ce mode de distribution (fig. 180) est très employé dans les stations centrales. De l'usine U partent des *fils d'alimentation* ou *feeders* F, F, qui aboutissent à certains points servant de centre de distribution *c*, *c* (aucune dérivation n'est prise sur le parcours des feeders). Aux centres de distribution sont établis des conducteurs *principaux* ou de *distribution* M, M, qui

se rattachent aux feeders et sur lesquels s'embranchent les fils des abonnés. On établit donc un réseau de conducteurs principaux auxquels le courant est fourni en des points nombreux par des feeders. Le potentiel se trouve ainsi égalisé dans tout le réseau quelles que soient les variations de la consommation, à la condition qu'il soit maintenu fixe aux centres d'alimentation. Dans ce but, des fils fins partant de ces centres et nommés *fils pilotes* aboutissent à l'usine où ils commandent des voltmètres. Un

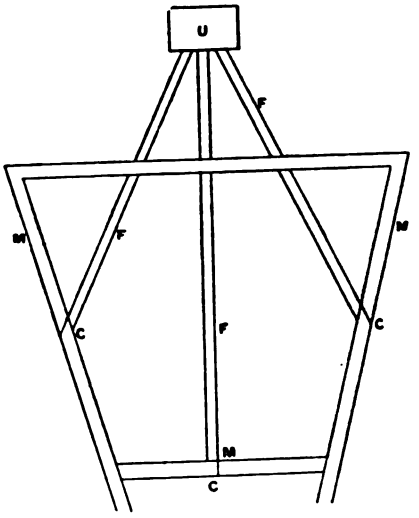


Fig. 180.

rhéostat est disposé sur chaque feeder et il est manœuvré d'après les indications du voltmètre.

En multipliant suffisamment les centres de distribution, on peut étendre la zone d'action. On cherche autant que possible à former avec les conducteurs de distribution des figures fermées ; car si un feeder vient à manquer en un point, le courant peut y arriver par les conducteurs voisins. Le système à trois fils est applicable à une distribution par feeders. Dans ce cas, pour égaliser le courant dans les deux circuits, on se sert de l'appareil suivant nommé *Egalisateur* placé au centre de distribution.

Le troisième fil, qui ne sert ordinairement que de conducteur de compensation, n'est pas ramené à l'usine ; on emploie au centre de distribution un système formé de deux induits calés sur

le même arbre et tournant dans le même champ. On fait communiquer un balai de chaque induit avec le conducteur de compensation, tandis que chacun des balais restants est relié à un des conducteurs principaux. Si les lampes ne sont pas uniformément réparties sur les deux circuits, un des induits fonctionne comme moteur et absorbe du courant dans le circuit qui n'a pas assez de lampes, tandis que l'autre induit, agissant comme générateur et mis en mouvement par le premier, ajoute du courant au circuit qui a trop de lampes.

Distribution à cinq fils. — Ce système, recommandé par Siemens et Halske, est employé à Paris pour la canalisation du secteur de Clichy.

Des feeders MM (fig. 181), partant de l'usine avec une diffé-

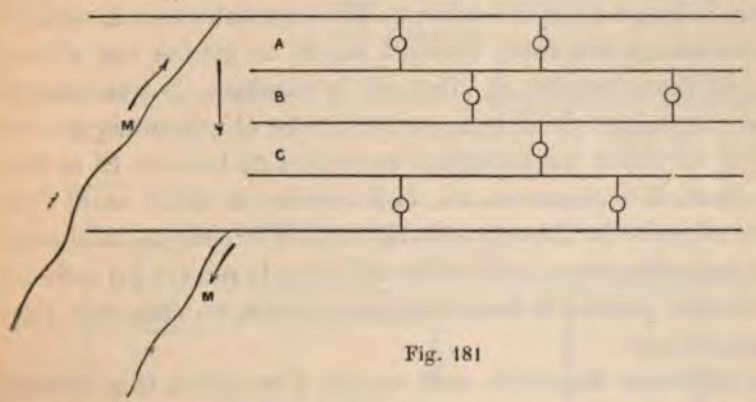


Fig. 181

rence de potentiel de 440 volts, amènent le courant dans le centre de distribution. Là sont établis trois autres fils A, B, C formant quatre ponts. Les lampes sont réparties sur chacun de ces ponts avec une différence de potentiel de 110 volts. Les choses se passent donc comme si l'on disposait les lampes par séries de quatre. Pour un fonctionnement normal, il faudrait que le nombre de lampes allumées fût le même sur chaque pont, ce qui est impossible à réaliser en pratique. Pour y remédier on dispose des égalisateurs analogues à ceux que nous avons décrits précédemment.

Tous les branchements sont disposés suivant le même principe.

On pense que ce système permet de distribuer l'électricité jusqu'à une distance de 2 500 mètres de la station centrale.

273. — Avant de quitter cette question du montage des lampes à incandescence, nous allons indiquer les principales solutions proposées pour mettre hors de circuit les foyers avariés, lorsqu'on emploie la disposition en série.

Nous avons parlé précédemment du système adopté par M. Bernstein dans ses lampes.

Dans la lampe Siemens, la dérivation, prise sur les bornes, comprend un électro-aimant qui ne peut attirer son armature que lorsqu'il est traversé par le courant total, c'est-à-dire quand le filament est brisé. Le mouvement de cette armature libère un ressort qui vient établir un court circuit entre les deux bornes.

Enfin la lampe à faible tension qu'Edison construit en Amérique pour l'éclairage des rues, contient un fil de platine qui s'élève entre les deux branches du filament de charbon. Ce troisième fil traverse le support de la lampe à l'extérieur et communique avec un fil de fer mince qui maintient un ressort en tension. Si le filament casse, il se forme un arc, et le courant se divise entre l'extrémité négative du filament et le fil central ; ce courant suffit pour fondre immédiatement le fil de fer et libérer le ressort qui enfonce une cheville mettant la lampe en court circuit, en éteignant l'arc en même temps.

Ces différents dispositifs sont encore d'invention trop récente pour que l'on puisse savoir lequel d'entre eux est le plus avantageux.

274. Montage combiné de régulateurs et de lampes à incandescence. — En général, lorsqu'on a à faire une installation importante d'éclairage, il est préférable de placer les régulateurs et les lampes à incandescence sur des circuits distincts alimentés par des machines différentes ; de cette manière le fonctionnement est toujours beaucoup plus régulier.

On peut cependant réunir tous les foyers sur un même circuit, et les différents systèmes de couplage que nous avons indiqués ci-dessus sont applicables. Toutefois on met le plus souvent les

foyers en quantité, afin d'éviter autant que possible qu'ils se nuisent mutuellement dans leur marche, mais il faut avoir soin, s'ils n'exigent pas tous la même différence de potentiel, d'ajouter des résistances auxiliaires sur les dérivations de ceux qui prennent le moins de volts. On perd évidemment une certaine énergie, mais c'est le moyen le plus sûr d'obtenir un bon éclairage.

Ces résistances auxiliaires se calculent de façon à avoir aux extrémités de la dérivation la différence de potentiel exigée. Supposons, par exemple, que nous ayons à installer simultanément des lampes Edison de 100 volts et des régulateurs de 65 volts et de 4 ampères. Il faudra ajouter à la dérivation de chaque régulateur une résistance R telle que

$$65 + R \times 4 = 100$$

d'où

$$R = 8{,}75 \text{ ohms.}$$

On peut encore établir un circuit distinct pour l'incandescence et monter les régulateurs en dérivation sur un autre circuit

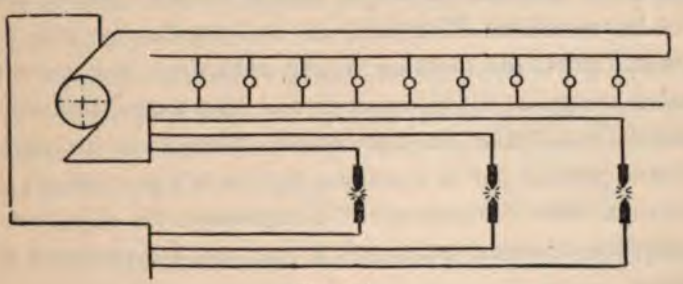


Fig. 182.

(fig. 182) ; par ce moyen, la lumière des lampes à incandescence n'est plus influencée par la variation des arcs.

275. Production du courant. — Tous les appareils susceptibles de fournir un courant peuvent produire de la lumière ; la seule considération qui empêche de les adopter est le prix de revient de cette lumière.

Dans un laboratoire, pour des recherches scientifiques ou des opérations médicales, quand on veut obtenir certains effets lumi-

neux de courte durée, on peut employer les piles. Celles de Bunsen, les éléments au bichromate conviennent parfaitement à cet usage, parce qu'ils ont une grande force électromotrice. Il en est de même pour la plupart des éclairages domestiques, dont l'importance ne justifie pas l'emploi d'une machine à vapeur ou même d'un moteur à gaz.

Mais dans l'industrie, pour éclairer de vastes espaces d'une façon régulière, il faut bannir absolument la pile : elle coûte trop cher d'entretien, exige trop de main-d'œuvre et demande trop de place. On s'en est servi dans les débuts, quand on ne connaissait pas d'autres moyens de produire l'électricité ; depuis l'invention des machines électriques, on a complètement renoncé à son usage.

Les machines électriques de tous les systèmes peuvent être employées pour l'éclairage, pourvu que leur intensité et leur force électromotrice soient proportionnées au courant exigé par les lampes dont on se sert. Nous avons déjà examiné cette question dans le chapitre consacré aux machines électriques ; nous n'insisterons plus que sur le point suivant. Le moteur destiné à mettre en marche la machine électrique doit être aussi régulier que possible et les variations d'intensité du courant doivent être évitées avec soin. Aussi les moteurs à gaz ordinaires, qui agissent par secousses brusques, conviennent-ils mal à cet usage, à moins qu'on n'ajoute à l'installation une batterie d'accumulateurs qui régularise le courant produit par la dynamo. Si l'on n'a pas recours à cette solution qui offre l'inconvénient d'augmenter les dépenses, il ne faut employer comme machines à gaz que des moteurs à deux cylindres.

Les changements d'intensité du courant ont pour effet, non seulement de faire varier la lumière, mais encore de détériorer très rapidement les filaments des lampes à incandescence. Mais c'est surtout dans les foyers à arc que les variations lumineuses sont sensibles, puisque, comme nous l'avons vu en étudiant la construction de ces lampes, la dimension de l'arc varie avec l'intensité du courant.

Les accumulateurs peuvent servir à la production de la lumière ; mais ils ont le même défaut que les piles : ils ne sont pas économiques, exigent une grande main-d'œuvre et prennent beaucoup

de place. Ils sont cependant susceptibles d'être employés dans certains cas particuliers, que nous avons énumérés en étudiant leurs applications.

Il est enfin une précaution fort sage qu'il est utile d'observer toutes les fois qu'on monte une installation assez importante d'éclairage électrique, c'est de se pourvoir de dynamos de rechange, afin qu'en cas d'accident à la machine ordinaire, le service ne soit pas interrompu.

Cette mesure augmente naturellement les frais de premier établissement ; on peut toutefois diminuer le surcroît de dépenses de la manière suivante. Au lieu de prendre une dynamo correspondant à la puissance totale nécessaire, on en installe plusieurs plus faibles qui ensemble produisent cette puissance, et il suffit d'avoir comme rechange une machine de ce modèle réduit, dont le prix est moins élevé. Supposons par exemple qu'il s'agisse d'un éclairage absorbant 60 chevaux ; on aura intérêt à monter non pas une dynamo de 60 chevaux, mais 2 de 30 ou encore 3 de 20 ; car il suffira de disposer dans le premier cas d'une troisième dynamo de 30 chevaux, dans le second d'une quatrième de 20, pour pouvoir parer aux accidents.

Cette combinaison offre un autre avantage dans les installations où tous les foyers ne sont pas allumés simultanément ; elle permet de mettre les machines en marche et de les arrêter successivement suivant les besoins de l'éclairage.

276. Calcul des conducteurs. — Le fer n'est pas employé comme conducteur dans les installations d'éclairage électrique, à cause de sa faible conductibilité.

On ne se sert que du cuivre et du bronze phosphoreux ou silicieux. On emploie rarement des fils ayant plus de 5 millimètres de diamètre, la pose devenant alors trop difficile. Au-dessus de cette dimension, on se sert de câbles.

La détermination du diamètre est très importante. On a intérêt à l'augmenter pour diminuer la résistance et par suite la force motrice dépensée ; mais on est limité par des considérations économiques à cause du prix élevé du métal.

On doit aussi veiller à ce que l'intensité du courant ne dépasse

pas une certaine limite; car le conducteur peut s'échauffer et produire des accidents. Suivant M. Fontaine, la température du câble dépend de la nature de l'isolement et des conditions d'installation. Un fil nu ayant une section de 1 millimètre carré, par exemple, laisse facilement passer 10 ampères sans échauffement anormal, tandis qu'un câble de 70 millimètres carrés isolé au caoutchouc supporte à peine 2 ampères par millimètre carré.

Voici les chiffres qu'on adopte généralement pour l'intensité des courants traversant des conducteurs en cuivre :

	Ampères par millimètre carré de section.
Fils nus tendus en l'air.	6
Fils recouverts de coton.	4
Fils recouverts de caoutchouc	2,5
Câbles à grand isolement ayant une section comprise entre 10 et 200 millimètres carrés	1,5
Câbles à grand isolement ayant une section supérieure à 200 millimètres carrés, ou renfermant les deux conducteurs sous la même enveloppe	1,00 à 0,75.

Ces chiffres n'ont rien d'absolu; ils indiquent simplement les limites qu'il est prudent de ne pas dépasser.

En pratique pour les conducteurs isolés, on adopte comme moyenne le chiffre de 2 ampères par millimètre carré de section.

D'après M. Fontaine, la perte de force électromotrice due à la canalisation doit être environ de 10 p. 100 répartie comme il suit : 6 p. 100 pour les conducteurs principaux, 2 p. 100 pour les conducteurs intermédiaires, et 2 p. 100 pour les dérivations. Quand on emploie, par exemple, des lampes de 100 volts, il faut calculer la dynamo pour qu'elle donne 110 volts entre les bornes.

Pour calculer la perte en volts provenant des conducteurs, on emploie la formule de ohm :

$$E = IR;$$

I représente l'intensité du courant, R la résistance du conducteur, E donne le nombre de volts absorbé par cette résistance.

Par exemple, supposons un courant de 3 ampères dans un fil de cuivre ayant 2 millimètres de diamètre et 100 mètres de longueur.

Le tableau ci-dessous nous donne 0,00508 ohm pour la résistance ar mètre. Nous aurons donc 0,51 ohm pour 100 mètres.

$$E = 3 \times 0{,}508 = 1{,}524 \text{ volt.}$$

Dans le calcul du diamètre du conducteur on a à tenir compte, omme on le voit, des deux éléments suivants : Nombre d'ampères naximum pouvant passer dans le fil ; nombre de volts perdus par uite de la résistance du circuit. On ne peut donc procéder que ar tâtonnements, et le calcul est quelquefois assez long. Pour viter ces difficultés, les constructeurs dressent généralement des ables qui permettent de simplifier beaucoup la question. Nous mpruntons le plan du tableau suivant à M. Von Gaisberg (*Montage des appareils pour l'éclairage électrique*).

TABLE GÉNÉRALE POUR LE CALCUL DES DIAMÈTRES DES FILS DE CUIVRE

DIAMÈTRE	SECTION	RÉSISTANCE par mètre.	INTENSITÉ LIMITE			POIDS par mètre.
			Un ampères par millim. carré.	Deux ampères par millim. carré.	Trois ampères par millim. carré.	
1	2	3	4	5	6	7
mill.	mill. c.	ohms.	amp.	amp.	amp.	grammes.
0,5	0,20	0,0814	0,2	0,4	0,6	1,75
1,0	0,79	0,0203	0,8	1,6	2,4	6,99
1,5	1,77	0,00904	1,8	3,5	5,3	15,73
2,0	3,14	0,00508	3,1	6,3	9,4	27,96
2,5	4,91	0,00325	4,9	9,8	14,7	43,69
3,0	7,07	0,00226	7,1	14,1	21,2	62,92
3,5	9,62	0,00166	9,6	19,2	28,9	85,63
4,0	12,57	0,00127	12,6	25,1	37,7	111,84
4,5	15,90	0,00100	15,9	31,8	47,7	141,55
5,0	19,64	0,000814	19,6	39,3	58,9	174,75
5,5	23,76	0,000672	23,8	47,5	71,3	211,45
6,0	28,27	0,000565	28.3	56,5	84,8	251,64
6,5	33,18	0,000481	33,2	66,4	99,5	295,33
7,0	38,49	0,000415	38,5	77,0	115,5	342,51
7,5	44,18	0,000362	44,2	88,4	132,5	393,19
8,0	50,27	0,000318	50,3	100,5	150,8	447,36
8,5	56,75	0,000281	56,7	113,5	170,2	505,03
9,0	63,62	0,000251	63,6	127,2	190,8	566,19
9,5	70,88	0,000226	70,9	141,8	216,6	630,85
10,0	78,54	0,000203	78,5	157,1	235,6	699,00

Partant des intensités qu'on s'impose comme limites, 1, 2,

3 ampères par millimètre carré, on trouve dans les colonnes 4, 5, 6 les nombres d'ampères correspondants passant par millimètre carré dans les fils de différents diamètres. Ces nombres ont été obtenus en divisant les nombres d'ampères 1, 2, 3 par les différentes sections des fils. On peut donc, connaissant le nombre d'ampères imposé comme devant passer par un conducteur, déterminer directement son diamètre. Inversement, connaissant le diamètre d'un fil, on trouvera le nombre d'ampères qu'on peut lui imposer sans dépasser une limite déterminée.

La colonne 3 donne la résistance par mètre de chaque fil et permet de calculer la résistance totale d'une canalisation.

La colonne 7 indique le poids par mètre des différents fils et par suite le poids de cuivre employé.

Les exemples suivants montrent comment on se sert de cette table.

Exemple. — Supposons qu'on veuille installer en dérivation 50 lampes Edison sur un circuit présentant une longueur totale de 100 mètres (aller et retour).

Ces lampes exigeant 100 volts et 0,7 ampère, la dynamo devra fournir 100 volts pour les lampes.

L'intensité dans ce circuit est $0,7 \times 50 = 35$ ampères; admettons qu'on s'impose comme limite maxima 2 ampères par mm^2. Nous trouvons à la 5e colonne du tableau le chiffre 39,3 correspondant à un diamètre de 5 millimètres.

La résistance du conducteur est donnée par $0,000\,814 \times 100 = 0,0814$ ohm, et la perte en volts $R = 0,0814 \times 35 = 2,85$ volts. La perte due à la canalisation est donc 2,85 p. 100; elle est admissible.

La machine devra fournir par suite 102,85 volts à ses bornes.

Au lieu de s'imposer le nombre d'ampères limite par millimètre carré, on peut se donner le nombre de volts maximum perdu pour vaincre la résistance de la canalisation. Reprenons l'exemple précédent. Supposons qu'on adopte 3 p. 100 pour la perte dans les conducteurs.

L'intensité est 35 ampères, et la tension exigée par les lampes 100 volts; la perte admise pour le conducteur est $0,03 \times 100 = 3$ volts.

On a : $R = \frac{3}{35} = 0{,}08$ ohm. La résistance par mètre est $\frac{0{,}08}{100} = 0{,}0008$ ohm.

La 3e colonne du tableau nous indique le nombre 0,000814 correspondant à un diamètre de 5^{mm}. La section de ce fil est $19^{mmc},64$, comme le montre la 2e colonne. L'intensité par millimètre carré est donc $\frac{35}{19{,}64} = 1{,}8$ ampères; on peut admettre ce chiffre.

Si le calcul avait donné une intensité plus forte par millimètre carré, on essaierait pour le diamètre un nombre un peu supérieur.

Le poids de cuivre est donné par

$$174^{gr},75 \times 100 = 17{,}47 \text{ kilogrammes.}$$

276 *bis*. Calcul de la force motrice. — Le travail dépensé, soit par les lampes, soit par la canalisation, se calcule d'après la formule.

$$T = \frac{EI}{g} \text{ kilogrammètres.}$$

Exemple. — Installer en tension 5 bougies Jablochkoff de 4 millimètres sur un circuit présentant une longueur totale de 500 mètres (aller et retour). On s'impose la condition de ne pas dépasser 10 p. 100 pour la perte en volts à travers les conducteurs.

Une bougie de 4 millimètres exige 8 ampères et 42 volts à ses bornes. La machine devra donc fournir 8 ampères, puisque toutes les bougies sont en série, et $5 \times 42 = 210$ volts pour les bougies. Il faut y ajouter 21 volts pour les conducteurs; en tout 231 volts.

La résistance totale du conducteur est donnée par

$$\frac{21}{8} = 2{,}6 \text{ ohms;}$$

et sa résistance par mètre est

$$\frac{2{,}6}{500} = 0{,}0052 \text{ ohm.}$$

Le tableau nous indique pour le fil un diamètre de 2^{mm}, ce qui correspond à une intensité de 2,5 ampères par millimètre carré.

Le travail est donné par $\frac{231 \times 8}{g} = 184{,}8$ kilogrammètres.

En admettant que la dynamo rende 90 p. 100, la force motrice nécessaire est $\frac{184{,}8}{0{,}9} = 205$ kilogrammètres.

Nota. — Les résultats indiqués par le calcul ne doivent jamais être regardés que comme des limites inférieures.

Il existe comme toujours une distance assez grande entre les chiffres de la théorie et ceux de la pratique.

APPAREILS ACCESSOIRES D'UNE INSTALLATION ÉLECTRIQUE

La distribution de l'électricité à travers une canalisation exige certains appareils accessoires destinés à assurer la régularité de l'éclairage et à prévenir tout danger.

277. Voltmètres. Ampèremètres. Compteurs d'électricité. — Pour constater l'intensité du courant, on se sert de l'ampèremètre. Cet appareil doit être installé directement sur les circuits dont on désire connaître l'intensité.

Lorsque les lampes sont disposées toutes en série, on place l'ampèremètre sur l'un des conducteurs. Si les lampes sont toutes en dérivation, on le met sur l'un des conducteurs principaux. Enfin, quand on a plusieurs séries de lampes disposées en dérivation, on dispose un ampèremètre sur chacune de ces dérivations.

L'ampèremètre se place dans la chambre des machines, mais à une assez grande distance de la dynamo pour ne pas subir son influence. Pour la même raison, on l'éloigne autant que possible des conducteurs à haute intensité qui pourraient se trouver dans le voisinage.

Pour reconnaître les différences de potentiel, on fait usage du voltmètre, que l'on place toujours en dérivation entre les bornes dont on cherche la différence de potentiel. Il ne faut pas que la dérivation soit fermée d'une manière absolue ; le courant ne doit pas traverser constamment l'appareil, et on ne le met en circuit par un commutateur qu'au moment voulu.

On ajoute parfois au voltmètre un appareil indicateur destiné à avertir des moments où la tension devient trop forte ou trop faible.

A cet effet, aux extrémités de la course de l'aiguille du voltmètre

sont placées deux butées communiquant avec deux lampes diversement colorées. L'aiguille ferme le circuit sur l'une ou l'autre de ces lampes suivant les variations de la tension. On dispose en outre quelquefois sur le circuit une sonnerie qui se met en mouvement quand une des lampes s'allume.

De même que l'ampèremètre, le compteur d'électricité se place directement sur le courant principal, ou sur le circuit dont on cherche la consommation.

278. Régulateur de courant. — Le courant produit par la dynamo doit varier avec le travail nécessaire dans le circuit extérieur. Nous avons vu, en étudiant les différents systèmes d'excitation des machines, que l'enroulement compound permettait d'obtenir ce résultat d'une manière automatique. Avec les autres enroulements il faut modifier la production de la dynamo suivant le nombre de lampes en service.

On pourrait croire, au premier abord, qu'il suffit pour cela de faire varier la vitesse de rotation. Mais cette opération est fort difficile dans la pratique; elle est même impossible quand la force est prise sur un moteur général, ce qui se présente dans beaucoup d'usines. Aussi se sert-on, pour arriver à ce but, d'une série de résistances auxiliaires qu'on introduit dans le circuit ou qu'on en retire suivant les besoins.

L'appareil est formé en principe d'une série de spirales en maillechort constituant des groupes séparés, mais reliées entre elles, comme l'indique la figure 183, par des bandes de cuivre. Chaque bande est attachée à un plot *a, b, c* d'un commutateur à manette. Le pivot de celui-ci communique avec un bout du fil de ligne arrivant en M. L'autre bout s'attache en *a*. On voit qu'en déplaçant la manette on peut mettre en communication les deux extrémités du fil de ligne sans y interposer de résistance, ou bien intercaler un nombre de spires voulu, c'est-à-dire une résistance déterminée.

Pour le montage du régulateur, il peut se présenter trois cas, suivant que la dynamo est excitée en série, en dérivation, ou par une machine indépendante. Dans le premier cas, les résistances se placent sur le circuit principal, pour compenser les varia-

tions de résistance provenant de l'allumage ou de l'extinction des lampes. Avec l'excitation en dérivation ou l'excitation indépendante, les résistances sont intercalées sur le circuit dérivé ou sur le circuit excitateur, afin de faire varier l'intensité du champ magnétique et de ramener la force électromotrice à sa valeur normale.

La disposition suivante est adoptée par la Société Edison. Des

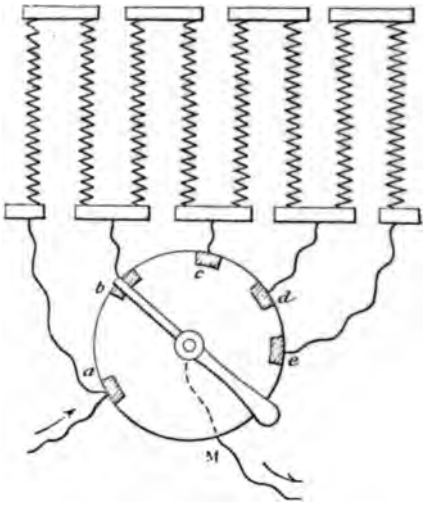


Fig. 183.

bobines en fil de maillechort sont disposées parallèlement à côté l'une de l'autre, et leurs extrémités aboutissent à une série de segments métalliques, comme dans la figure 183. La première bobine est reliée à l'une des bornes de l'appareil, l'autre borne communique à un curseur qu'on peut faire mouvoir avec une vis sans fin munie d'une manivelle. Suivant la place qu'il occupe, le curseur vient en contact avec un segment plus ou moins éloigné, c'est-à-dire qu'il introduit une résistance moins ou plus grande dans le circuit.

Quand plusieurs dynamos sont destinées à être accouplées ensemble, leurs régulateurs sont disposés de façon à pouvoir être manœuvrés isolément, et à être commandés, si on le veut, par un même arbre, de façon à opérer le même réglage sur toutes les

machines à la fois. Grâce à ce système, on commence par régler chaque machine isolément par son régulateur spécial, et quand l'équilibre est établi entre toutes les dynamos, on les commande toutes ensemble par le régulateur général. Nous verrons plusieurs exemples de ce mode de régulation dans les stations centrales.

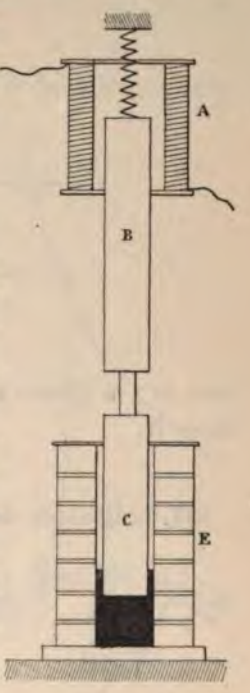


Fig. 184.

279. Régulateurs automatiques. — Il existe diverses dispositions permettant le réglage automatique du courant. Le régulateur Houghton (fig. 184), destiné à régulariser la différence de potentiel aux bornes d'une dynamo, se compose d'un solénoïde A à fil fin monté en dérivation sur les bornes de la machine. L'armature en fer doux B porte à son extrémité inférieure un cylindre C en ébonite qui plonge dans du mercure. Des résistances E intercalées sur le circuit excitateur de la machine sont placées les unes au-dessus des autres. Suivant la tension, l'armature B est plus ou moins attirée ; le mercure s'abaisse donc ou s'élève et augmente ou diminue le nombre des résistances E en circuit. La différence de potentiel aux bornes se trouve ainsi régularisée automatiquement. Un ressort à boudin permet le réglage de l'appareil.

280. Résistances. — Nous avons vu, en parlant du montage des foyers électriques, que sur le circuit des lampes à arc on dispose des résistances pour remplacer les lampes mises hors circuit. Voici comment on peut résoudre la question. Si l'on veut, par exemple, mettre hors circuit les trois lampes *a*, *b*, *c* (fig. 185), et leur substituer la résistance R, on coupe le circuit en *x*; les deux bouts du fil sont rattachés l'un à la borne *p*, l'autre à l'axe de rotation de l'interrupteur *f*. En arrière de la lampe *c* on attache un fil venant se relier à l'extrémité *r* de la résistance R, dont l'autre bout s'attache à la borne *m*. Quand les trois lampes *a*, *b*, *c* fonction-

nent, l'interrupteur est mis en contact avec *p*. Lorsque l'on met les lampes hors circuit, on amène l'interrupteur en contact

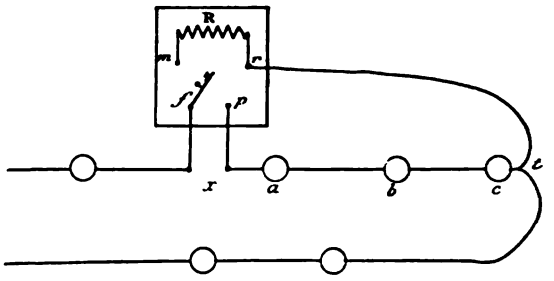


Fig. 185.

avec *m*; le circuit est ouvert en *p*, et le courant traverse la résistance R.

281. Indicateur de marche du courant. — Quand on veut suivre dans la chambre des machines le fonctionnement des différentes lampes, on se sert d'un appareil nommé *indicateur de marche*. Voici, comme exemple, celui de M. Cance. Cet appareil se compose d'un électro-aimant A traversé par le courant (fig. 186). En face du pôle P est un pendule mobile autour d'un point O, et terminé en bas par deux petits cylindres de même poids; l'un d'eux C est en fer doux, l'autre D est fait d'une substance non magnétique, en cuivre par exemple. Sous l'action du courant, le noyau B s'aimante, et le pôle P attire le cylindre C, en faisant prendre au pendule la position inclinée dans la figure. Quand le courant ne passe pas, le pendule revient à la verticale. On peut donc suivre le fonctionnement du courant.

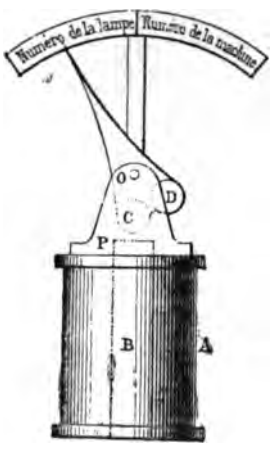


Fig. 186.

282. Parafoudres. — Quand une canalisation électrique est placée à l'extérieur des bâtiments, il est indispensable de la protéger

contre les effets de la foudre qui pourrait détruire les conducteurs et les appareils. Les parafoudres ont pour but de créer un écoulement à l'électricité atmosphérique en l'entraînant vers la terre.

Ces appareils sont basés sur le fait suivant : L'électricité provenant d'un coup de foudre possède une tension très élevée ; elle peut donc franchir facilement un obstacle, tel qu'une très faible solution de continuité dans un conducteur, tandis que le courant produit par une dynamo s'y trouverait arrêté. Cela étant, le conducteur de la dynamo se trouvant en P D (fig. 187), on établit une dérivation T allant à la terre et interrompue en un point *i* de son parcours sur une faible distance. Une décharge atmosphérique trouvera issue en ce point, tandis que le courant des dynamos restera dans le conducteur P D.

Fig. 187.

Plusieurs dispositifs ont été imaginés dans ce but. Dans le parafoudre à pointes, deux plaques sont placées en regard en *i*, l'une reliée au conducteur P D, l'autre au fil de terre T, et ces deux plaques sont pourvues de pointes disposées en face les unes des autres, sans se toucher.

Dans le parafoudre à lame isolante, les deux plaques sont séparées par une lame non conductrice très mince.

La dérivation T se rendant à la terre ne doit pas s'embrancher sur le conducteur d'un paratonnerre établi pour la protection de l'édifice ; il faut même, pour éviter tout accident, qu'elle en soit assez éloignée.

Elle est faite d'un fil de cuivre de 4 millimètres de diamètre, ou d'une corde formée de deux ou trois fils de 2 millimètres. On la relie par une forte soudure à la plaque de terre. Celle-ci est constituée par une lame de fer galvanisé ayant 5 millimètres d'épaisseur et une surface d'au moinsun mètre carré. On l'enfouit dans le sol en un endroit humide et, si cela est possible, dans

une nappe d'eau courante ou un puits. On la place dans une position verticale plutôt qu'horizontale.

Quand le conducteur n'entre pas en terre au pied même de l'édifice, il faut le disposer de façon qu'il soit bien visible jusqu'au point où il pénètre dans le sol. Il est nécessaire qu'il soit visité très souvent, surtout après les orages.

283. Parafoudre automatique. — Pour qu'une dynamo se trouve suffisamment protégée contre les décharges atmosphériques, il faut que chacun de ses conducteurs extérieurs soit muni d'un pa-

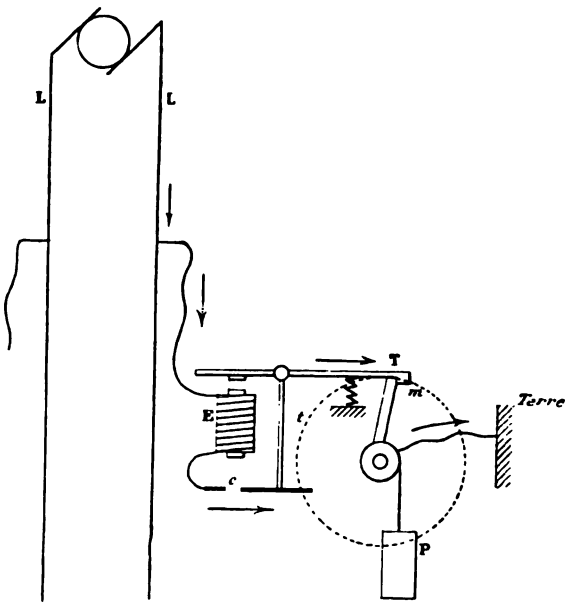


Fig. 188.

rafoudre. Mais il y a là un danger avec les instruments adoptés ordinairement. En effet, les pointes de chacun de ces appareils pouvant être fondues par une décharge et réunies, il s'établirait ainsi un court circuit mettant les deux pôles de la dyamo en communication directe avec la terre. La disposition suivante, adoptée par la *Central Electric Company* de Chicago, a pour but d'empêcher un pareil accident (fig. 188).

Une décharge atmosphérique se produisant, par exemple, sur la

ligne L, l'électricité suit la direction des flèches ; elle passe par l'électro-aimant E, traverse deux pointes de charbon placées en C, puis, par le levier T et le bras *m*, arrive à la terre. Mais en même temps, l'armature T est attirée ; une des pointes de charbon portée par le bras *t* se trouve éloignée de l'autre par suite du mouvement de l'armature. Les deux charbons ne peuvent donc entrer en fusion et se réunir entre eux. L'inconvénient signalé plus haut est ainsi évité.

De plus, l'armature T, en s'approchant de l'électro-aimant, dégage son extrémité de droite qui était maintenue en prise avec le bras *m* par l'effet du poids P. Le circuit est donc rompu. L'électro-aimant se désaimante. Le levier T est ramené à sa position primitive par un ressort, et il arrête de nouveau le bras *m* qui, après avoir fait un tour complet autour de son axe, vient se remettre en prise. Ainsi le parafoudre est replacé automatiquement dans sa position primitive, et il est prêt à fonctionner de nouveau s'il survient un autre coup de foudre. La seconde ligne est munie d'un appareil semblable, qui n'est pas indiqué sur la figure.

284. Coupe-circuit de sûreté. — Les diamètres des conducteurs, comme on l'a vu précédemment, sont calculés d'après l'intensité du courant qui doit les traverser. Mais si cette intensité se trouve dépassée par accident ou par inadvertance, les conducteurs s'échauffent et peuvent occasionner des incendies. Pour l'éviter, on place sur le circuit des fils de plomb ou d'un alliage fusible, qui fondent quand le courant devient trop fort et interrompent ainsi le circuit. Il faut déterminer le diamètre de ces fils de façon que leur fusion ait lieu avant que le cuivre ne soit trop chauffé. Ce diamètre dépend donc de celui du conducteur. Voici, à cet égard, quelques renseignements.

Pour les fils de plomb de petit diamètre, jusqu'à 1 millimètre, on compte comme intensité limite 8 ampères par millimètre carré ; pour les fils de plus grand diamètre, cette limite est de 5 à 6 ampères. Les chiffres suivants établissent le rapport entre les diamètres des fils de cuivre et les diamètres des fils de plomb qu'on peut employer comme coupe-circuits.

Diamètre du fil de cuivre.	Diamètre du fil de plomb.
1 millimètre.	0,8 millimètre.
2 —	1,5 —
3 —	2,0 —
4 —	3,0 —
5 —	deux fils de 3,0 —

On place un coupe-circuit à l'origine du conducteur principal *o* (fig. 189) ; on en dispose également d'autres *p*, *q* à la naissance de chaque branchement qu'on veut préserver.

Il est important de disposer tous ces appareils, soit sur les con-

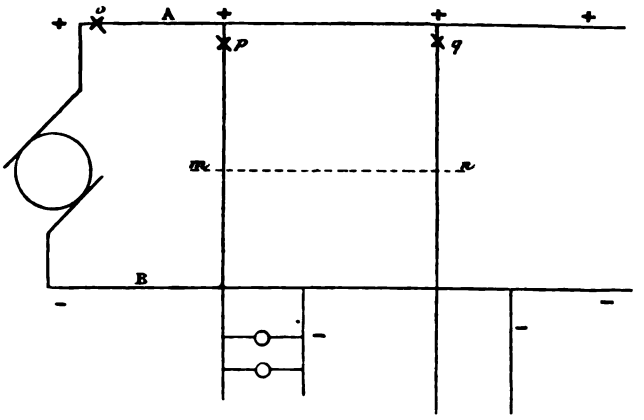


Fig. 189.

ducteurs aboutissant au pôle positif de la dynamo, soit sur ceux reliés au pôle négatif ; car si un court circuit vient à s'établir accidentellement dans la canalisation, par exemple en *m n*, le courant traversera toujours un appareil de sûreté en se rendant du conducteur A dans le conducteur B, ce qui pourrait ne pas arriver si ces appareils étaient placés tantôt sur le circuit positif, tantôt sur le négatif.

Les coupe-circuits ne doivent pas être placés dans des endroits humides. Il faut éviter également les locaux sujets à l'incendie ou susceptibles de renfermer des gaz explosibles.

Pour voir si un appareil de sûreté fonctionne convenablement, on produit un court circuit dans l'embranchemennt où il est placé, et on regarde si le fil fusible fond avant que le cuivre s'échauffe d'une façon anormale. Quand un coupe-circuit est

fondu sur un embranchement important, on doit veiller avec soin sur la machine ; car la fusion du fil mettant hors circuit une grande quantité de lampes, il peut se produire un dérangement dans l'allure de la dynamo.

Lorsqu'un fil de sûreté vient à fondre, on se trouve averti immédiatement qu'il existe un défaut dans la portion de la canalisation correspondante. Le vice provient soit du conducteur, soit du coupe-circuit lui-même qui est trop faible ou mal installé. Si on ne trouve rien d'anormal dans le conducteur, on n'a qu'à remplacer l'appareil de sûreté par un autre d'un numéro convenable et voir comment il se comporte. S'il résiste, c'est que le défaut se trouve dans la canalisation.

Il est nécessaire que le remplacement des appareils de sûreté puisse se faire rapidement et sans main-d'œuvre. Il existe beaucoup de modèles de ces appareils ; ceux de M. Grivolas, par exemple, se composent de barrettes qui supportent le fil de plomb et qu'on loge entre deux fortes pinces en cuivre communiquant avec les bouts du conducteur. Ils sont d'un usage très commode.

On a toujours quelques-uns de ces appareils de rechange, et on les met en place quand un coupe-circuit a été fondu ; ils portent l'indication du nombre d'ampères pour lequel ils ont été construits.

285. Indicateur d'isolement à la terre. — Il est important de pouvoir vérifier continuellement si une installation électrique est bien isolée par rapport à la terre, et d'être averti immédiatement d'un accident. L'appareil indiqué par la figure 190 résoud le problème d'une façon très simple.

Sur les deux conducteurs principaux A, B, on attache en dérivation un fil *m n* sur lequel on installe deux lampes à incandescence *a*, *b*, exigeant le même nombre de volts ; le milieu est relié à la terre par un fil *t*.

Si les conducteurs A et B ne touchent pas la terre, les deux lampes brûlent avec le même éclat. Si B a un contact avec la terre, la lampe *b* éclaire moins que *a* ou s'éteint ; il en est de même de la lampe *a* si le contact se trouve sur le conducteur A.

Quand A et B sont reliés tous les deux à la terre, les deux

lampes éclairent peu, mais donnent la même lumière. Pour savoir à quoi s'en tenir, on met alors une des lampes hors circuit au moyen d'un commutateur ; si la seconde lampe s'éteint, c'est que

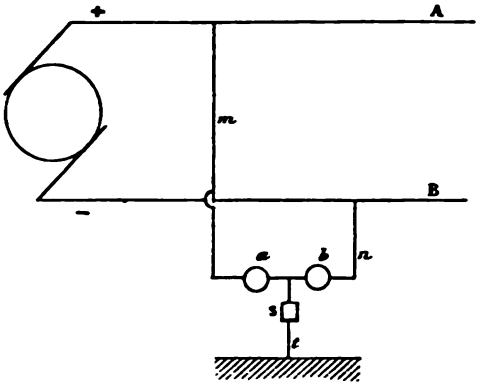


Fig. 190.

le conducteur est en bon état; si elle continue à brûler, c'est qu'il existe un défaut.

Pour compléter l'appareil, on place une sonnerie S sur le fil *t* ; elle se met en mouvement quand ce fil est parcouru par un courant, c'est-à-dire lorsqu'un contact avec la terre se produit sur un conducteur.

286. Interrupteurs. — Les interrupteurs servent à établir ou à interrompre le courant dans un circuit. Il existe une quantité de dispositifs plus ou moins différents les uns des autres. Nous ne les décrirons pas en détail ; nous nous bornerons à rappeler leur principe.

Dans l'interrupteur *à cheville*, chaque extrémité de la ligne aboutit à un bloc métallique. Les deux blocs sont séparés, et, pour établir la communication, on enfonce entre eux une cheville qui les réunit.

Dans l'interrupteur *à écrou*, la communication est établie par le serrage d'un écrou.

Dans celui *à manette*, on fait l'ouverture ou la fermeture en manœuvrant à droite ou à gauche une manivelle.

La construction de ces appareils exige beaucoup de précautions. Il faut que les surfaces de contact soient toujours en parfait état,

et, dans ce but, on doit éviter les étincelles qui se forment toujours à la fermeture et surtout à la rupture du circuit. Les positions d'ouverture et de fermeture doivent être parfaitement déterminées, de façon que l'opérateur puisse faire la manœuvre rapidement et sans hésitation. La dimension des pièces est déterminée d'après l'intensité du courant qui les traverse pour éviter tout échauffement. Les boutons ou manettes sont toujours faits en matière isolante, telle que la porcelaine et l'ébonite. Pour les courants à haute tension, il faut que l'opérateur soit mis à l'abri de tout danger, et que la manœuvre, surtout d'interruption, se fasse très rapidement.

La façon d'installer ces appareils a une grande importance. Il faut les placer à portée de la main et bien en vue, pour qu'on puisse vérifier l'état des contacts. Eviter les endroits humides; si l'on est forcé de les établir dans un local de cette espèce, interposer entre le mur et l'appareil un corps isolant. En plein air, placer l'appareil dans une boîte en tôle, et disposer l'entrée et la sortie du conducteur de façon que l'eau qui s'accumule à sa surface ne puisse pas pénétrer dans l'appareil en suivant le fil. Eviter les locaux contenant des matières très combustibles ou des gaz explosifs ; en ce cas, on place les appareils dans un local voisin ou dans la salle des machines avec un conducteur spécial.

287. Commutateurs. — Ces appareils sont destinés à changer la direction d'un courant. Ils sont construits sur le même principe que les interrupteurs et exigent les mêmes précautions. Les modèles sont très nombreux.

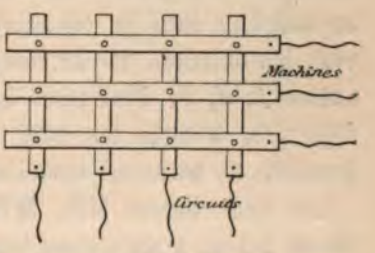


Fig. 191.

La disposition indiquée par la figure 191 permet, quand on a, par exemple, trois machines et quatre circuits, de relier l'une des machines avec l'un quelconque des circuits. L'appareil comporte deux rangées de lames de laiton croisées à angle droit et isolées entre elles. Aux points de jonction sont percés des trous où l'on peut enfoncer des chevilles métalliques. Les lames horizontales

communiquant avec les machines, et les lames verticales avec les circuits, on voit qu'en enfonçant une cheville dans un trou, on établit à volonté la communication entre l'un des circuits et l'une des machines.

288. Tableaux de distribution. — Les appareils énoncés ci-dessus se placent, autant que possible, dans la chambre des machines. On les dispose sur un panneau en bois ou en ardoise, auquel aboutissent les conducteurs des dynamos et les circuits des lampes, et c'est sur ce tableau que l'on opère la fermeture et l'ouverture des circuits pour allumer et éteindre les lampes. En outre, quand l'installation comporte plusieurs dynamos, ce tableau est disposé de façon que l'on puisse envoyer dans n'importe quel circuit le courant de telle ou telle dynamo, en cas de suspension d'une partie de l'éclairage ou d'accident à l'une des machines.

Le tableau représenté figure 192 est celui de l'installation de la Banque de France, à Paris, qui comprend 3 dynamos et 6 circuits de lampes. Il a été établi par la Compagnie Edison.

Les conducteurs des dynamos arrivent aux deux barres de cuivre, MN, M'N', les conducteurs des pôles positifs à la barre MN, les conducteurs des pôles négatifs à la barre M'N' ; les blocs métalliques A,A' sont reliés à la machine de 200 lampes, B,B' à la machine n° I de 500 lampes, C,C' à la machine n° II de 500 lampes. En *a, a', b, b', c, c'*, sont des interrupteurs à chevilles métalliques. Lorsque les chevilles sont en place, le courant des dynamos arrive au tableau ; dans le cas contraire, les machines sont hors de circuit. En outre de ces six interrupteurs, les barres en portent deux autres en *d, d'*, dont nous indiquerons le rôle plus loin. On voit déjà que, lorsque les huit interrupteurs sont fermés, les trois dynamos se trouvent associées en quantité.

Les deux barres MN, M'N' sont reliées par de gros torons de fils de cuivre à six autres interrupteurs placés à la partie centrale du tableau et correspondant aux six circuits des lampes. Chacun de ces interrupteurs est muni d'un plomb de sûreté en *p, p*... Les désignations des six circuits sont indiquées par des étiquettes fixées sur le tableau.

En temps normal, la dynamo de 200 lampes sert à l'alimentation

d'un seul circuit, celui de l'imprimerie ; et les interrupteurs *d, d'* restent ouverts. Mais, pour parer au cas où l'une des machines de 500 lampes ne se trouverait pas en état de fonctionner, et afin

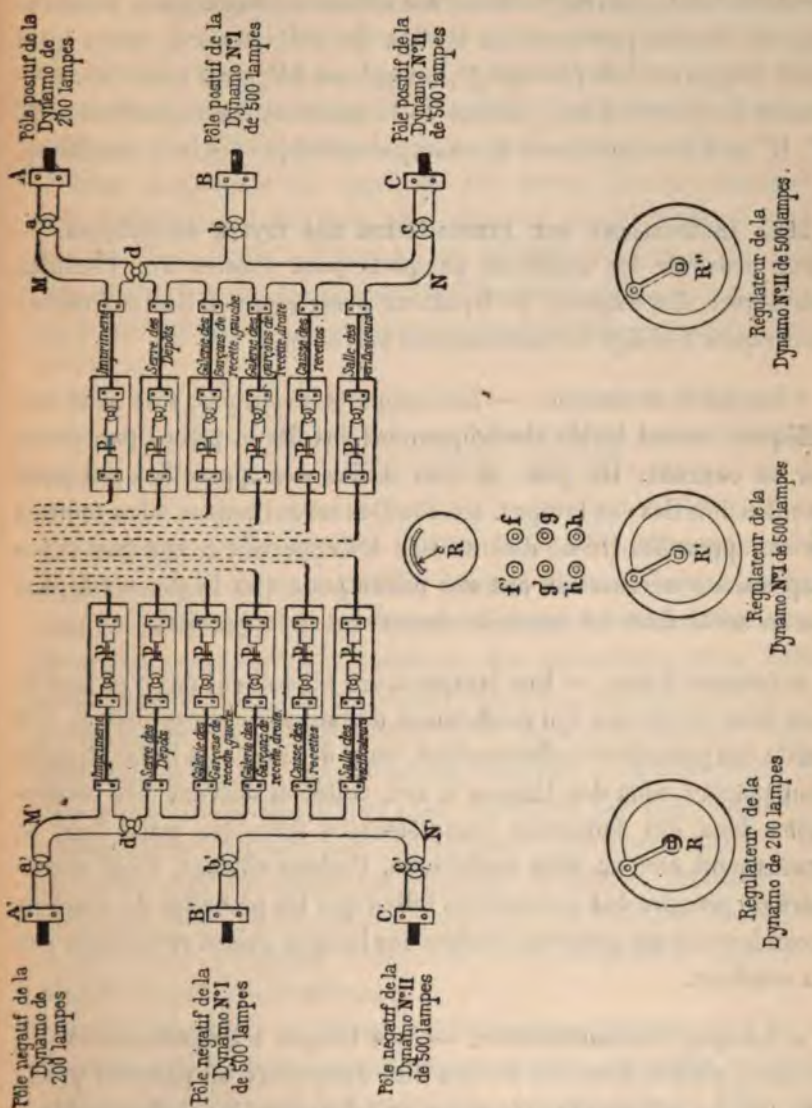


Fig. 192.

d'empêcher l'extinction de l'éclairage, il est utile de pouvoir mettre la dynamo de 200 lampes sur le circuit général. Il suffit pour cela de placer les chevilles *d, d'*.

En R est le voltmètre, du système Deprez-Carpentier, destiné à contrôler la différence de potentiel aux bornes des dynamos. Ces bornes sont respectivement reliées aux boutons *ff'*, *gg'*, *hh'*. Ces derniers, analogues aux boutons des sonneries électriques, communiquent d'autre part avec les bornes du voltmètre, de sorte qu'il suffit d'appuyer à la fois sur *ff'*, ou *gg'*, ou *hh'*, pour avoir les différences de potentiel aux bornes de la machine correspondante. R, R', R'' sont les régulateurs du champ magnétique des trois machines.

289. Instructions sur l'installation des foyers électriques. — Pour prévenir les accidents auxquels peut donner lieu l'emploi des foyers électriques, le Syndicat professionnel des industries électriques a rédigé les instructions suivantes :

« *Supports de lampes.* — Les supports de lampes, s'ils sont métalliques, seront isolés électriquement des fils et pièces parcourus par le courant. De plus, si l'on utilise des appareils à gaz pour fixer les douilles des lampes, les douilles seront isolées elles-mêmes de ces appareils. On ne doit utiliser les appareils à gaz que si les dispositions nécessaires ont été prises pour que le gaz n'ait plus aucun accès dans les conduits desservant les appareils.

« *Lampes à arc.* — Les lampes à arc ne doivent pas être installées dans les locaux qui renferment des substances explosives. S'il existe des poussières inflammables, ou si des matières inflammables sont placées sous des lampes à arc, celles-ci doivent être renfermées dans des lanternes complètement fermées, mais dont le dessus peut être en toile métallique. Partout ailleurs, il est nécessaire de prendre des précautions telles que les parcelles de charbon incandescent qui peuvent tomber des lampes soient recueillies par un cendrier.

« *Lampes à incandescence.* — Les lampes à incandescence qui seraient placées dans des locaux dits dangereux où peuvent pénétrer soit des substances explosives, soit des poussières inflammables, doivent être enfermées dans une lanterne ou dans une double ampoule, et la jonction entre la ligne et la lampe se faire à l'intérieur de cette ampoule.

« Le renouvellement des lampes dans ces lanternes ne peut s'effectuer que lorsque le courant est interrompu dans le circuit qui les alimente. »

Avec les renseignements que nous venons d'exposer, un ingénieur pourra, dans la plupart des cas, résoudre le problème d'une installation électrique. Pour compléter cette étude, nous allons donner quelques exemples qui pourront servir de guides.

Nous diviserons la question en deux classes principales : 1° Installations privées dans lesquelles les conducteurs ne sortent pas de l'immeuble à éclairer ; 2° Stations centrales distribuant l'électricité suivant les besoins des consommateurs et empruntant les voies publiques pour l'établissement de leur canalisation.

1° INSTALLATIONS PRIVÉES

290. Canalisation. — Les conducteurs de lumière électrique, employés dans les installations isolées, sont en cuivre de haute conductibilité. Ils doivent être recouverts d'une matière isolante lorsqu'ils sont placés à l'intérieur des bâtiments ; cette matière varie suivant la nature des locaux : dans les endroits secs, il suffit d'envelopper le cuivre de coton ou de soie et de recouvrir le tout d'un ruban bitumé ; au contraire, lorsque les conducteurs sont exposés à l'humidité, il faut avoir recours à des revêtements plus isolants, en chanvre, jute, caoutchouc, gutta-percha, etc. ; lorsqu'on se sert de caoutchouc, comme le contact direct de cette substance et du cuivre peut quelquefois être nuisible, on étame le cuivre et on l'entoure d'abord de coton enduit de bitume, sur lequel on met le caoutchouc.

Les conducteurs se fixent sur les murs au moyen, soit de crochets émaillés, soit de petits tasseaux de bois, soit enfin de boutons en os. On peut aussi les placer dans des rainures en bois recouvertes entièrement. Nous ne pouvons mieux faire à ce sujet que de reproduire les instructions rédigées sous le patronage du Syndicat professionnel des industries électriques.

« *Conducteurs en plein air.* — Les fils employés en plein air peuvent être nus. Dans ce cas, ils seront placés sur isolateurs en porcelaine ou autre substance équivalente comme isolement, et attachés à ces isolateurs. Ils seront écartés le plus possible des masses métalliques telles que gouttières, tuyaux de descente, etc. S'ils passent nécessairement à moins de 10 centimètres de ces masses, ils doivent en être séparés par un isolant convenable.

« L'entrée dans les bâtiments des fils venant de l'extérieur se fera de bas en haut, de matière à éviter la pénétration de l'eau de pluie le long du fil.

« Les fils nus seront placés hors d'atteinte et disposés de manière que les fils d'aller et de retour du courant ne puissent être mis en contact accidentellement.

« *Conducteurs intérieurs.* — A l'intérieur des maisons d'habitation les fils nus seront proscrits d'une manière absolue. Ils le seront également dans tous les locaux réputés dangereux où peuvent pénétrer soit des substances explosives, soit des poussières inflammables. Dans tous les autres cas où leur emploi peut être admis, on doit se conformer aux prescriptions indiquées ci-dessus.

« Les fils isolés peuvent être apparents ou logés dans des bois rainés. Les fils isolés apparents seront écartés des murs, et rigidement fixés sur des taquets en bois ou autre matière isolante. Exception toutefois peut être faite dans les étages des maisons d'habitation où les murs et les cloisons sont suffisamment secs ; là les fils pourront être fixés directement sur les murs. De même, ils pourront être fixés directement sur toutes les pièces apparentes de bois faisant partie des clôtures à l'intérieur des locaux très secs.

« Tous les conducteurs dans lesquels circulera un courant de plus de 10 ampères seront fixés de telle sorte que le fil d'aller et celui de retour ne puissent jamais venir en contact. Les conducteurs parcourus par un courant de moins de 10 ampères pourront être placés côte à côte, à la condition qu'ils soient bien isolés.

« L'emploi de bois rainés est proscrit dans les locaux humides. Si les murs et cloisons sont assez secs pour que l'installation puisse être faite en plaçant les conducteurs dans des bois rainés fermés par un couvercle, leur écartement pourra être quelconque. Toute-

fois, on ne devra jamais placer les fils d'aller et de retour dans la même rainure. Les bois rainés sont recommandés comme protection mécanique des conducteurs beaucoup plus que comme protection électrique.

« Dans les locaux humides, soit naturellement, soit par nécessité de métier, les conducteurs seront placés sur isolateurs et rigidement tendus, de façon qu'il ne puisse y avoir contact ni entre les fils, ni entre les fils et les murs. Toutefois, on pourra appliquer directement sur les murs les conducteurs sous plomb, sans limite d'écartement entre eux.

« A la traversée des murs, des planchers, les fils doivent toujours être isolés et leur isolement mécaniquement protégé. Il en est de même partout où les fils sont exposés à être détériorés par le frottement ou toute autre cause destructive.

« Des conducteurs doubles, renfermant les deux fils sous une même enveloppe, peuvent être employés dans tous les cas, mais l'isolement électrique des deux âmes doit être parfaitement assuré ainsi que leur écartement.

« L'usage de la terre, des conduites d'eau ou de gaz et des charpentes métalliques comme conducteur de retour est interdit.

« *Echauffement des conducteurs.* — Dans chacune des sections du circuit, le diamètre des fils doit être en rapport avec l'intensité du courant, de telle sorte qu'il ne puisse se produire en aucun point du circuit un échauffement dangereux pour l'isolement du conducteur ou des objets environnants.

« Les raccords directs de fil à fil et les raccords indirects, par l'intermédiaire des coupe-circuits ou commutateurs, doivent être également établis de façon à ne pas introduire dans le circuit de partie faible au point de vue mécanique ou présentant une résistance électrique dangereuse.

« *Interrupteurs et commutateurs.* — Des interrupteurs, permettant de couper le circuit dans les principales parties de l'installation, doivent être installés auprès de la machine et sur les principaux branchements. Quand la rupture du courant peut donner lieu à un arc dangereux, il est nécessaire qu'un point d'arrêt existe à

chaque position de repos, et que les pièces de contact soient fixées sur une matière incombustible, telle que marbre, ardoise, etc.

« Il est interdit de placer les interrupteurs ou commutateurs dans les locaux définis dangereux.

« *Coupe-circuits.* — A partir de la machine et à tous les points de branchement, on doit interposer des fils fusibles ou coupe-circuits automatiques. »

EXEMPLES D'INSTALLATIONS

291. Éclairage des usines. — C'est dans les usines et dans les ateliers que l'emploi de la lumière électrique présente la plus grande économie; car les établissements de ce genre possèdent à peu près tous une force motrice suffisante pour qu'on puisse actionner les dynamos sans avoir à installer une machine à vapeur spéciale. Les frais de premier établissement se trouvent donc réduits d'autant et, par suite, l'intérêt et l'amortissement du capital engagé qui, comme on le verra plus loin, entrent pour une part importante dans les charges annuelles de l'éclairage. En outre, le personnel de l'usine suffit en général à surveiller l'installation électrique.

L'avantage est encore plus grand lorsque la force motrice est fournie par une chute d'eau; car les dépenses annuelles se trouvent réduites au graissage des dynamos, à la consommation des charbons dans les régulateurs à arc et au renouvellement des lampes à incandescence.

Cette qualité, jointe à celles que l'électricité possède au point de vue de la simplicité et de la régularité du service, de la diminution des risques d'incendie, etc., a facilité considérablement les développements de la lumière électrique dans ce genre d'applications, et les installations déjà faites sont nombreuses et importantes. Nous nous contenterons d'en citer quelques-unes pour montrer les différentes solutions adoptées.

Usine Cail. — La surface totale éclairée est de 23 400$^{m^2}$, répartis de la manière suivante : 22 000$^{m^2}$ pour divers ateliers d'ajustage,

montage, modèles, machines, outils, etc., 700$^{m^2}$ pour magasins et bureaux; 407$^{m^2}$ et 300$^{m^2}$ pour deux bureaux de dessin.

MM. Sautter et Lemonnier, qui se sont chargés de cette entreprise, auraient pu réduire au minimum le nombre des machines, en employant des tensions très élevées de 1 200 à 1300 volts, et en plaçant plusieurs foyers en série. Mais, en présence des dangers auxquels on est exposé, surtout dans des ateliers, avec des différences de potentiel aussi fortes, ils ont préféré choisir des machines à grande intensité et à tension modérée, et mettre les foyers en dérivation. Un autre avantage de cette disposition, c'est que chaque lampe à arc, ayant son circuit qui aboutit aux machines, est indépendante de tous les autres foyers; on peut donc en régler la marche à son gré. Enfin la dynamo peut être disposée de façon qu'elle ait une résistance intérieure aussi faible que possible, et qu'elle produise aux bornes une force électromotrice à peu près constante, quel que soit le nombre de foyers en fonctionnement.

La machine employée, du système Gramme type vertical, a une résistance intérieure de 0, 008 ohm et produit, à la vitesse de 700 tours, un courant de 280 ampères et de 70 volts. A cette vitesse, elle peut être commandée directement par un moteur Mégy à grande vitesse et à détente variable, et elle absorbe en pleine marche 35 chevaux. Quatre machines semblables sont utilisées pour l'éclairage de l'usine Cail. Trois d'entre elles alimentent respectivement 24,26 et 22 régulateurs Gramme. La quatrième fait fonctionner 22 régulateurs Gramme et 83 lampes à incandescence Edison.

L'éclairage comporte donc 94 régulateurs à arc et 83 lampes à incandescence.

L'intensité lumineuse produite est représentée par :

50 foyers à arc ayant une intensité de	100	carcels, soit	5 000	carcels.
22 — —	150	— —	3 300	—
22 — —	40	— —	880	—
83 lampes à incandescence	2	— —	166	—
		TOTAL. . . .	9 346	carcels.

Par seconde, les foyers à arc absorbent en moyenne 1,38 cheval; les lampes Edison, 10 kilogrammètres environ, transmissions

comprises. La force motrice employée est d'à peu près 140 chevaux.

Chaque régulateur à arc a son circuit distinct, et les lampes à incandescence sont groupées sur deux circuits, l'un destiné aux magasins, l'autre aux bureaux.

Le matériel électrique a coûté 72 673 francs, pose comprise. Quant à la dépense horaire, elle est estimée en moyenne à 0 fr. 245 pour chaque foyer à arc, et à 0 fr. 02 pour chaque lampe à incandescence, y compris les frais de charbon pour la force motrice, d'entretien des machines, de crayons pour les régulateurs et de renouvellement des lampes à incandescence.

Ateliers de l'artillerie à Paris. — L'installation électrique des ateliers du dépôt central de l'artillerie, à Paris, réunit des régulateurs et des lampes à incandescence, de manière à donner un éclairage général et à mettre à la disposition des ouvriers la lumière nécessaire au travail des pièces dans toutes les positions.

Dans l'atelier de précision, l'installation comprend 2 régulateurs Gramme de 300 bougies et 82 lampes à incandescence, dont 2 de 25 bougies et 80 de 10 bougies.

Les régulateurs et les lampes de 25 bougies servent à l'éclairage général des ateliers. En outre, chaque ouvrier a à sa disposition une lampe de 10 bougies fixée à un support qui coulisse sur la tige d'un pied mobile ; de cette façon, il peut déplacer le foyer lumineux et s'éclairer suivant ses besoins. La lampe reçoit le courant par un fil souple qui est fixé par une extrémité au support et par l'autre à une planchette à bornes.

Les lampes sont du système Swan ; elles sont montées sur des supports à baïonnette et à commutateur pour l'extinction de chacune d'elles.

Le courant est fourni par 2 dynamos Gramme auto-régulatrices, disposées de façon à être montées en quantité si le courant des deux machines devient nécessaire pour l'éclairage ; chacune d'elles peut fournir 50 ampères et 70 volts. Sur un panneau placé près des machines, on a fixé un ampèremètre qui indique s'il est nécessaire de grouper les deux machines. Ce panneau porte également les commutateurs pour le groupement et les rhéostats qui permet-

tent l'allumage des régulateurs. La force motrice nécessaire est de 6 chevaux par dynamo ; elle est fournie par la machine fixe horizontale qui commande l'atelier.

L'atelier des gros modèles possède également une dynamo du même type mise en mouvement par une machine demi-fixe. Elle sert à alimenter 3 régulateurs Gramme et 52 lampes Swan de 10 bougies, qui sont répartis dans les ateliers des gros modèles, des modèles d'armes, de la lithographie et des divers bureaux afférents à ces services.

Raffineries de la Méditerranée. — L'éclairage des ateliers des raffineries de la Méditerranée comprend 540 lampes Edison de 16 bougies, et est scindé en deux services, dont les circuits sont distincts. Le service de jour est alimenté par une dynamo Gramme, type supérieur, de 100 volts et 75 ampères, et celui de nuit par une dynamo Edison de 100 volts et 150 ampères. Le circuit de cette dernière est disposé en boucle ; quant à l'autre, il est assez court pour qu'on ait jugé cette précaution inutile.

Les frais d'exploitaton, comprenant le charbon, le renouvellement des lampes et les salaires du personnel, s'élèvent par an à 12 435 francs, pour 550 000 lampes-heure, ce qui met à 2,26 centimes le prix de la lampe-heure.

L'éclairage électrique présente un intérêt particulier dans cette installation ; sa couleur blanche permet de trier les pains de sucre avec beaucoup plus d'exactitude qu'on ne peut le faire à la lumière du gaz.

292. Eclairage des magasins. — Les magasins, qui renferment toujours des matières facilement inflammables, ont un grand intérêt à adopter l'éclairage électrique, avec lequel les dangers d'incendie se trouvent considérablement diminués. L'électricité a, dans ce cas, un autre avantage, c'est qu'elle n'altère pas, comme le gaz, les nuances des couleurs, qualité très appréciée par la clientèle de ces établissements. Les magasins du Bon Marché, du Louvre, du Printemps, du Gagne-Petit, etc., à Paris, possèdent actuellement la lumière électrique.

Magasins du Bon Marché. — L'installation, terminée à la fin de

l'année 1887, est certainement l'une des plus considérables qui aient jamais été faites dans les établissements privés. Elle comprend 290 régulateurs Cance, 96 bougies Jablochkoff et environ 3 000 lampes à incandescence, produisant une intensité lumineuse totale de plus de 20 000 carcels.

Toute la machinerie est réunie dans deux immenses salles situées au deuxième sous-sol des magasins. La première salle, dans laquelle sont réunies les machines établies au mois d'octobre 1886, alors que l'administration du Bon Marché voulait se rendre compte des qualités des différents appareils électriques, et quelques dynamos ajoutées lors de l'installation définitive, comprend, comme partie mécanique : 1° une machine Corliss simple de 75 chevaux; 2° une machine Corliss jumelle de 200 chevaux ; 3° une machine horizontale à grande vitesse de 100 chevaux, actionnant directement la transmission de commande des dynamos et servant de machine de rechange ; 4° quatre générateurs Belleville de 100 chevaux chacun, alimentant ces différents moteurs à vapeur.

La partie électrique se compose de : 1° deux dynamos Gramme type supérieur de 550 ampères chacune ; 2° deux dynamos Edison de 500 ampères chacune ; 3° une dynamo Sautter et Lemonnier de 300 ampères; 4° huit dynamos Gramme à courants alternatifs de douze foyers Jablochkoff chacune.

Le courant des dynamos Gramme de 550 ampères, des dynamos Edison et de la dynamo Sautter et Lemonnier est conduit par des gros circuits individuels à un tableau principal dit de commutation, qui distribue ce courant à : 1° un tableau distributeur pour lampes Cance, n°s 1 à 50 ; 2° quatre tableaux distributeurs pour 30 lampes Cance chacun, n°s 51 à 170 ; 3° un tableau distributeur pour lampes à incandescence (600 environ).

Les huit dynamos Gramme à courants alternatifs envoient leur courant à deux tableaux distributeurs qui alimentent 96 foyers Jablochkoff. Sur ces huit dynamos, il n'y en a que six employées comme machines normales, les deux autres servent de rechange.

La deuxième salle, exécutée en décembre 1887, est celle qui mérite le plus de fixer l'attention ; car elle est beaucoup plus importante que la précédente et présente un très beau coup d'œil,

grâce à l'heureux agencement des chaudières, machines à vapeur, dynamos et tableaux de commutation qu'elle renferme.

La partie mécanique comprend : 1° quatre machines Corliss simples de 150 chevaux chacune, dont une servant de rechange aux trois autres ; 2° une série de sept générateurs Belleville de 150 chevaux chacun, servant à alimenter les trois machines Corliss ; quatre de ces générateurs sont toujours en service, tandis que les trois autres servent de rechange.

La partie électrique renferme 24 dynamos Gramme type supérieur de 375 ampères chacune, partagées en quatre groupes de six dynamos, actionnés chacun par une machine Corliss au moyen d'une transmission intermédiaire.

Un de ces quatre groupes est affecté spécialement à servir de réserve aux trois autres, soit en remplaçant un de ces groupes en totalité, soit par la substitution d'une dynamo à l'une quelconque de celles de n'importe quel groupe. En outre, sur la série des six dynamos de chaque groupe, l'une de celles-ci est disposée pour servir de réserve aux cinq autres.

De ces vingt-quatre dynamos, un circuit spécial relié à chacune d'elles conduit le courant à un tableau de commutation général partagé en autant de parties qu'il y a de groupes. Le tableau répartit son courant de la manière suivante :

Le premier groupe, qui constitue celui de rechange, envoie son courant, au moyen de barres horizontales placées derrière le tableau, aux trois autres groupes, de manière à pouvoir être substitué à l'un d'eux en cas de besoin ; les mêmes barres servent d'ailleurs pour le remplacement d'une seule machine par une des dynamos du groupe de réserve.

Parmi les trois groupes restants, l'un est relié au moyen de cinq gros circuits au tableau de commutation de la première salle pour servir de secours en cas d'arrêt de celle-ci.

Un autre groupe amène son courant par cinq circuits à un tableau distributeur pour vingt départs d'incandescence alimentant 2 500 lampes environ.

Le dernier groupe est relié par cinq circuits à quatre tableaux distributeurs pour 30 lampes Cance chacun, n°s 171 à 290, et à un

tableau distributeur pour 5 lampes Cance de 30 ampères et 3 lampes Cance de 50 ampères.

L'agencement de commutation, dû à M. Cance, mérite d'être signalé, car il réalise toutes les conditions de simplicité et de sécurité que l'on peut exiger pour le service. Il permet non seulement de remplacer facilement une dynamo par une autre, mais encore de vérifier à tout instant l'intensité du courant de chaque machine au moyen d'un seul ampèremètre par groupe de six dynamos, ce qui évite d'employer autant d'ampèremètres que de machines et réduit les dépenses d'installation.

En outre de l'ampèremètre, chaque groupe possède un voltmètre que l'on place en dérivation sur les bornes d'une des machines, en appuyant sur deux boutons de contact.

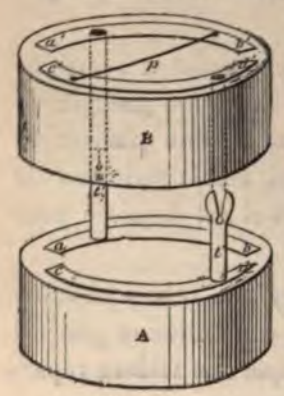


Fig. 193.

Les tableaux de distribution portent, pour chaque lampe Cance : 1 commutateur de mise en marche et d'extinction, 1 coupe-circuit, 1 indicateur de courant, 1 rhéostat et enfin 1 socle destiné à recevoir un ampèremètre portatif, permettant de vérifier à chaque instant l'intensité du courant de chaque foyer sans troubler le fonctionnement de celui-ci. La disposition imaginée à cet effet par M. Cance est fort simple et mérite d'être indiquée, car elle peut être appliquée en maints cas analogues (fig. 193).

Le coupe-circuit se compose de deux parties distinctes. L'une A est fixée au tableau ; elle porte deux secteurs en cuivre *ab* et *cd* isolés l'un de l'autre, auxquels aboutissent les deux extrémités du conducteur et qui présentent deux tiges en cuivre *t*, *t'*. Ces tiges pénètrent dans deux trous pratiqués sur la pièce supérieure B du coupe-circuit, qui est mobile, et amènent le courant à deux autres secteurs *a' b'* et *c' d'*, entre lesquels se trouvent le fil de plomb *p*.

Le socle destiné à recevoir l'ampèremètre portatif est identique à la pièce A du coupe-circuit ; ses secteurs *a b* et *c d* sont reliés par des fils extérieurs aux secteurs correspondants de cette pièce.

Lorsqu'on veut connaître le nombre d'ampères qui passe dans un circuit, sans troubler aucunement son fonctionnement, on relie

les deux bornes de l'ampèremètre aux tiges *t*, *t'* du socle, le courant passe alors à la fois par le fil de plomb *p* du coupe-circuit et par l'ampèremètre. Puis on retire la pièce B du coupe-circuit et l'ampèremètre se trouve seul traversé par le courant. Pour remettre les choses en leur état normal, on replace la pièce B du coupe-circuit et on enlève l'ampèremètre.

Quant au tableau de distribution pour les lampes à incandescence, il renferme par circuit un coupe-circuit et une lampe-témoin.

— Le groupement des circuits s'effectue à l'aide de robustes verrous en cuivre ; l'introduction du courant dans les circuits est produite au moyen d'un levier à bascule en connexion permanente avec l'un des pôles du circuit, et qui, en s'abaissant, se met en contact avec l'autre pôle.

Les conducteurs qui relient les dynamos au tableau de commutation, sont posés en caniveau sous le sol. A partir de ce tableau toute la canalisation est placée dans des moulures en bois ou dans des caniveaux réservés à cet effet dans les planchers supérieurs d'où les fils descendent aux appareils. Le réseau d'alimentation est croisé de manière à assurer, en toutes circonstances, l'éclairage au moins partiel de tous les locaux, sans aucune exception.

Les foyers électriques sont répartis de façon qu'un même local ne renferme pas des lampes de types différents. A cet effet, les régulateurs Cance sont établis au rez-de-chaussée et au premier étage, les bougies Jablochkoff au deuxième étage, les lampes à incandescence dans les sous-sols et aux étages supérieurs.

Toutes les manœuvres d'allumage et d'extinction se font de la machinerie même, par ordres téléphoniques donnés des étages supérieurs. Aucun appareil électrique n'est à la portée du public et du personnel étranger au service de l'éclairage.

293. Eclairage des établissements publics. — Pour les établissements publics, où un très grand nombre de personnes sont appelées à pénétrer, le principal avantage de l'électricité résulte de ses qualités hygiéniques ; l'atmosphère d'une salle où fonctionne la lumière électrique ne se trouve pas viciée comme avec la combustion du gaz et la température ne subit pas d'élévation appréciable du fait de l'éclairage.

Hôtel de Ville de Paris. — L'installation actuelle de l'Hôtel de Ville, exécutée à la suite d'un éclairage d'essai monté en 1883, comprend environ 4 500 lampes à incandescence.

La vapeur est fournie par 4 chaudières de Naeyer, employées pendant le jour au chauffage de l'édifice et installées dans une grande salle des sous-sols. Les machines à vapeur et les dynamos sont réparties dans trois pièces différentes A, B, C, par suite du manque de place. Deux de ces pièces renferment chacune deux moteurs à vapeur compound et à condensation, construits par MM. Weyher et Richemond; ces moteurs ont chacun une force nominale de 50 chevaux dans la salle A, et de 65 chevaux dans la salle B. Les premiers commandent 2 dynamos Edison de 300 lampes de 16 bougies et 0,75 ampère; quant aux seconds, ils actionnent 2 machines Gramme, type supérieur, excitées en dérivation et pouvant alimenter 625 lampes Edison de 16 bougies et de 0,6 ampère. La troisième salle C renferme 3 machines à vapeur demi-fixes, à détente et à condensation, système compound, de la force nominale de 35 chevaux; 3 dynamos Gramme de 375 lampes de 16 bougies et 0,6 ampère, et 3 batteries de voltamètres régulateurs Reynier; ces dernières contiennent chacune 53 éléments pesant 66 kilogrammes, et sont destinées à régulariser l'éclairage et à le prolonger, en cas d'accident aux machines, pendant vingt à vingt-cinq minutes, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'on puisse évacuer l'édifice sans bousculade.

De la salle A partent 3 circuits principaux. Ils aboutissent à des tableaux de distribution, où ils se subdivisent en 48 circuits secondaires alimentant 32 lampes de 10 bougies et 475 lampes de 16 bougies; ces lampes servent à éclairer des bureaux situés du côté de la rue de Rivoli, les salles de commissions donnant sur la cour centrale, la salle et les couloirs du Conseil municipal.

Cette partie de l'installation exécutée en 1883 fonctionne en temps normal; le reste, au contraire, a été monté plus tard et ne sert que pendant les soirées et les fêtes données à l'Hôtel de Ville.

De la salle B partent deux circuits principaux aboutissant à des tableaux qui comportent 58 circuits secondaires; ceux-ci alimentent 2 016 lampes de 10 bougies placées dans la salle à manger et les grands salons.

Enfin la salle C, qui produit l'éclairage de la grande salle des fêtes, dessert 1 944 lampes de 10 bougies au moyen de 3 circuits principaux et de 46 circuits secondaires.

Toute la canalisation électrique est dissimulée sous des moulures en bois et se trouve, par suite, en dehors des atteintes du public.

Institut anatomique de Vienne. — L'éclairage électrique est employé dans les quatre salles de travail du nouvel Institut anatomique de Vienne, qui ont chacune une surface de 148^{m^2}, une hauteur de $5^m,40$, et renferment 10 grandes tables de dissection et 11 petites.

La nature même du travail à effectuer sur ces tables nécessitait des précautions spéciales dans l'installation. Il fallait obtenir un éclairage se rapprochant le plus possible de la lumière diffuse du jour, c'est-à-dire donnant un éclairement suffisant sur chacune des tables sans produire en aucun point d'ombre un peu plus forte. Le problème a été fort bien résolu par l'emploi dans chaque salle de 3 lampes à arc Gramme de 15 ampères, dans lesquelles le foyer lumineux est masqué et renvoie par réflexion les rayons vers le plafond.

L'installation comporte en outre 4 régulateurs à arc de 12 ampères dans les deux amphithéâtres de l'Institut, et 112 lampes Edison de 16 bougies, 100 volts et 0,6 ampère, réparties dans deux salles d'étude renfermant quarante tables de travail, et dans les chambres des professeurs.

La machinerie se compose de deux groupes comprenant chacun une dynamo Edison-Hopkinson, dont l'un est gardé en réserve. Il suit de là que les lampes à arc et à incandescence sont alimentées par la même dynamo, mais elles sont montées sur deux circuits distincts placés en dérivation sur les bornes de celle-ci. Les régulateurs à arc sont reliés par deux en tension; quant aux lampes à incandescence, elles sont toutes en quantité.

L'éclairage par double réflexion sur le plafond donne de très bons résultats et peut être avantageusement appliqué toutes les fois qu'on a besoin d'une lumière diffuse.

294. Eclairage des théâtres. — La suppression du gaz dans les

[illegible] le spectacle et son remplacement par la lumière électrique [illegible] seul moyen d'obtenir une sécurité complète au point de vue des dangers d'incendie. Le fait, malheureusement mis en évidence par la catastrophe de l'Opéra-Comique, en 1887, a appelé particulièrement l'attention sur la question de l'éclairage des théâtres et, depuis cette époque, l'emploi de la lumière électrique a été rendu obligatoire dans les salles de spectacle d'un certain nombre de villes, Paris, Lyon, Madrid, Naples, etc.

La sécurité n'est pas, d'ailleurs, la seule qualité que possède [illegible] dans ce cas. La lumière électrique ne développe aucune chaleur et ne peut donner lieu, comme le gaz, à des élévations de température si gênantes pour les spectateurs. Elle ne modifie pas les teintes et ne nuit facilite le travail des peintres de décors et des costumiers, car pour juger de l'effet d'une couleur à la représentation, ceux-ci n'ont plus à se préoccuper des changements qui peuvent résulter de l'éclairage. Enfin elle ne détériore pas les décors, les tableaux et les draperies.

Tous ces avantages ont frappé les directeurs des théâtres qui se bornent pour la plupart à employer la lumière électrique. C'est ainsi qu'en outre des villes que nous avons indiquées ci-dessus, nous pouvons citer comme ayant abandonné le gaz, les théâtres de Nancy, Saint-Étienne, Marseille, Toulouse, La Rochelle, Perpignan, etc., presque toutes les salles de Londres; celles du Grand Opéra, Drury-Lane, Deutsches, Friedrich Wilhelm, Residenz Residenz, à Berlin; le Opern et du Burg, à Vienne; etc., etc.

En général, les machines nécessaires à l'éclairage sont établies dans des annexes des bâtiments mêmes. Quelquefois on a préféré les placer au dehors, soit par suite du manque de place, soit pour augmenter la sécurité; cette solution est surtout avantageuse dans les théâtres qui n'ont pas un très grand nombre de lampes, et dans le voisinage desquels se trouve une station centrale susceptible de leur fournir le courant dont ils ont besoin. C'est ce qui a été fait à Berlin, à Milan, à Lyon, etc.

D'après l'ordonnance du préfet de police de Paris, en date du 17 avril 1888, la différence de potentiel ne doit pas, dans les théâtres de cette ville, dépasser 300 volts pour les courants con-

tinus. Pour les courants alternatifs, on peut mettre au plus 4 lampes à arc en série avec un nombre de lampes à incandescence correspondant à la même tension, c'est-à-dire à environ 180 volts. En dehors de ces limites, il faut une autorisation spéciale de la Commission supérieure des théâtres.

Grand Opéra de Paris. — Cette installation est l'une des plus importantes qui existent; en voici la description, telle qu'elle a été donnée à la Société Internationale des Electriciens par M. Am. Vernes, ingénieur en chef de la Compagnie continentale Edison :

« Les premières machines ont été installées en 1883. Il n'était pas encore question d'éclairer tout l'Opéra; le ministre des beaux-arts désirait, avant tout, mettre les magnifiques peintures de Baudry à l'abri de l'action destructive du gaz. Une première installation, limitée à l'éclairage des lustres, des grands foyers, du grand escalier, de la salle et de la rampe, comportant environ 1 800 lampes à incandescence et 20 foyers à arc, fut décidée.

« Les résultats obtenus, absence de chaleur, augmentation d'éclat dans la salle, furent trouvés si avantageux que le ministre se décida, en juillet 1886, à augmenter l'installation et à adopter d'une façon radicale la lumière électrique dans tout l'Opéra, afin de supprimer entièrement le gaz sur la scène et dans l'administration.

« Voici la répartition des lampes, telle qu'elle fut décidée à cette époque, l'intensité lumineuse des lampes devant être d'un quart supérieure à celle du gaz.

	Becs de gaz.	Lampes de 10 bougies.	Lampes de 16 bougies.
Administration.	1 269	1 165	40
Scène.	1 897	1 568	320
Salle et pavillon	2 254	1 212	306
Foyers et grand escalier.	1 967	1 010	642
Caves	68	68	
TOTAUX . . .	7 455	5 023	1 308

« Pour faire fonctionner toutes ces lampes, il a fallu installer un matériel mécanique et électrique très considérable. Il se compose de :

« 5 générateurs Belleville, dont 3 de 2450 kilogrammes de vapeur et 2 de 1250 kilogrammes.

« 9 machines à vapeur, dont : 1 Corliss de 250 chevaux à condensation, tournant à 60 tours ; 1 Armington et Sims de 100 chevaux à échappement libre, tournant à 300 tours ; 4 compound Weyher et Richemond de 140 chevaux à condensation, tournant à 160 tours ; 2 Weyher et Richemond de 20 chevaux, pour actionner les condenseurs ; 1 Weyher et Richemond de 40 chevaux, à échappement libre, tournant à 85 tours.

« 1 dynamo Gramme à courants alternatifs pour 24 bougies Jablochkoff, et 13 dynamos Edison, dont 5 de 375 ampères, 4 de 800 ampères, 3 de 300 ampères et 1 de 40 ampères.

« Chaque générateur Belleville peut, à volonté, être relié à la conduite générale de vapeur ou être isolé, soit par des clapets de retenue, soit par des valves. Les générateurs se trouvant à une distance moyenne de 60 mètres des moteurs, on a installé une conduite de vapeur double, afin d'éviter un arrêt quelconque provenant de la rupture d'un joint. A cet effet, de chaque extrémité de la batterie part une conduite de vapeur desservant les différents moteurs et venant se rejoindre au centre, de façon à former une véritable boucle se fermant sur les chaudières. On peut ainsi diriger la vapeur par la conduite de droite ou de gauche, ou dans les deux à la fois, et remédier rapidement à une avarie se produisant sur une des conduites.

« Il suffit des trois grands générateurs pendant les représentations pour assurer le service ; une des chaudières de 125 chevaux est tenue en pression comme secours. La machine Corliss actionne 5 dynamos de 500 lampes ainsi que la machine de 24 foyers Jablochkoff ; elle est en marche, ainsi que 3 machines compound actionnant chacune une dynamo de 800 ampères.

« La charge moyenne pendant le jeu étant de 3 200 à 3 400 ampères, on voit que les machines en service ne travaillent qu'aux trois quarts de leur force nominale ; elles sont ainsi dans d'excellentes conditions de marche. Il reste en réserve comme secours environ 280 chevaux.

« L'éclairage électrique à l'Opéra devant fonctionner jour et nuit toute l'année, il a fallu combiner le service des dynamos sur

des conduites toujours en charge ; ce résultat a été obtenu de la manière suivante :

« Le courant des dynamos arrive directement au centre d'un premier tableau de distribution comportant deux *départs-collecteurs* A et B, formés de quatre larges barres de cuivre, placées deux par deux au-dessous de ce tableau, pour aboutir respectivement à deux tableaux secondaires desservant chacun environ 20 circuits principaux ou colonnes montantes du théâtre.

« Au moyen de verrous à glissières, munis d'écrous de serrage, on peut à volonté envoyer le courant des dynamos dans le collecteur A ou dans le collecteur B. Lorsqu'on veut mettre en service, sur un des collecteurs en charge, une dynamo, on commence par la régler à la tension générale au moyen de son régulateur de champ magnétique. Lorsque la dynamo est bien réglée, ainsi que le moteur, on ferme le circuit en faisant glisser le verrou. La dynamo se trouve alors en quantité avec les autres. Pour la faire travailler, il suffit d'augmenter son champ magnétique et de le ramener à la même valeur que celui des autres dynamos. On règle alors son débit au moyen d'une aiguille indicatrice, de façon à faire travailler toutes les bobines également. La manœuvre se fait sans amener un écart de plus de 1 à 2 volts sur le réseau.

« Pendant le jeu, les dynamos de 500 lampes sont réunies en quantité sur le collecteur A, et les dynamos de 1 000 lampes sur le collecteur B ; ces deux collecteurs étant indépendants, les circuits du théâtre se trouvent ainsi répartis sur deux sources distinctes, ce qui, en cas d'avarie générale à tout un groupe, n'occasionnerait qu'une extinction partielle.

« Cependant on a la faculté de réunir en quantité, au moyen d'un verrou principal, les deux collecteurs A et B, ce qui permet d'alimenter les circuits du théâtre, soit à la fois avec les dynamos de 500 lampes et les dynamos de 1 000 lampes, soit avec les unes ou les autres séparément.

« Les régulateurs de champ magnétique sont placés sous le premier tableau d'arrivée de courant des dynamos. Les résistances sont montées sur des cadres en fonte munis d'isolateurs en porcelaine, placés perpendiculairement au mur. Un arbre longitudi-

nal, de 4 mètres de longueur, supportant les manettes de chaque régulateur, est maintenu par des bagues sur ces cadres. Chaque manette porte un encliquetage qui permet de l'embrayer à volonté sur une roue dentée calée sur l'arbre; celui-ci est terminé à chaque extrémité par un volant. Un seul homme suffit pour manœuvrer ensemble toutes les manettes embrayées et régler à la fois le potentiel des neuf ou dix machines Edison en service, suivant un voltmètre à indication constante.

« Nous avons vu que le courant des dynamos se divisait en deux tableaux de distribution. De ces tableaux partent environ 40 conduites principales, distribuant le courant à des branchements secondaires. La mise en charge de ces conduites principales ou colonnes montantes se fait de la salle des machines. Le service des branchements secondaires est fait par le personnel attaché au théâtre qui envoie le courant dans telle ou telle salle, suivant les heures d'éclairage. »

Les jeux de scène s'obtiennent par l'introduction sur les différents circuits de résistances formant un rhéostat régulateur. « Ce rhéostat a été combiné de façon à tenir dans l'espace resté libre près du trou du souffleur, sous le plancher de la scène. Les effets de lumière étant à régler sur 34 circuits différents, on a adopté une disposition semblable à celle des régulateurs de champ magnétique pour régler les rhéostats. Les manettes des rhéostats ont été disposées en gradins sur deux rangs de 17 ; elles peuvent pivoter ensemble ou séparément au moyen d'un encliquetage. Une lampe étalon, placée sur un tableau en face de chaque manette, permet de suivre l'effet de lumière obtenu sur une herse ou sur un portant qui est complètement caché aux yeux de l'opérateur. Grâce à cette combinaison, un homme suffit pour régler tout l'éclairage de la scène et contrôler environ 1 800 lampes.

« Les résistances de tous les rhéostats sont placées derrière le mur de scène, à 2 mètres en contre-bas du jeu d'orgue. Les fils de maillechort sont tendus sur des cadres en fer munis d'isolateurs en porcelaine. Ils sont rangés perpendiculairement au mur, comme des livres sur les rayons d'une bibliothèque, et disposés de façon qu'on puisse les sortir individuellement, s'il y a lieu, pour les visiter.

« Les herses à l'Opéra ont 24 mètres de longueur ; elles sont munies de tambours mobiles permettant d'obtenir des effets de coloration absolument nouveaux. Les portants ont chacun un interrupteur, un plomb de sûreté et une prise de courant. »

L'installation comporte en outre 180 accumulateurs de 60 kilogrammes, dont 120 sont destinés au service des veilleuses et 60 à celui des lampes de secours. Grâce à cette disposition, il n'y a pas à l'Opéra un seul foyer lumineux qui ne soit une lampe électrique.

D'après le traité passé entre l'Etat et la Société Edison pour une période de dix années, celle-ci se charge, moyennant le paiement d'une somme de 1 130 francs par représentation et de 2 000 francs par bal, de tous les frais d'exploitation, à l'exception des appointements du personnel technique nécessaire au service, pour lequel la direction de l'Opéra paie 25 000 francs par an.

295. Eclairage des gares de chemins de fer. — L'éclairage des grandes gares de chemins de fer et des voies qui y donnent accès, a une importance considérable au point de vue de la sécurité du service. L'électricité seule peut procurer aux Compagnies la quantité de lumière dont elles ont besoin au moyen d'un nombre relativement faible de foyers puissants.

La lumière électrique peut d'ailleurs lutter avantageusement avec le gaz dans cette application au point de vue du prix de revient : c'est ce qui résulte du rapport de M. Weissenbruch, ingénieur belge, au Congrès international des chemins de fer, tenu à Milan à la fin de 1887.

« Parmi les divers systèmes employés, il convient de choisir suivant les circonstances techniques et économiques. Sauf pour les gares de très minime importance, qui ne valent pas l'installation de systèmes spéciaux et où le pétrole doit être préféré, la lutte se circonscrit entre le gaz et l'électricité, le premier généralement plus économique, la seconde donnant un éclairage plus intensif et plus puissant. D'expériences récentes il résulte que, pour une installation neuve d'éclairage de grands espaces clos, l'électricité (lampes à arc) paraît être préférée au gaz à tous les points de vue, dès que le prix du mètre cube de gaz dépasse 0 fr. 18. »

Les applications ne sont pas encore très nombreuses; nous pouvons cependant citer les gares Saint-Lazare, de l'Est et de Lyon, à Paris; du Nord, à Bruxelles; de Berlin, Strasbourg, Hanovre, en Allemagne; de Budapest, en Hongrie; de Milan, en Italie, etc.

296. Eclairage des voitures de chemins de fer. — L'éclairage électrique des voitures de chemins de fer a donné lieu depuis quelque temps à de nombreuses expériences dont on n'a pas encore pu tirer aucune conclusion définitive. Deux systèmes sont actuellement en présence que nous allons indiquer rapidement.

Ligne de New-York-Boston. — Le système préconisé par M. Julien consiste à placer dans chaque voiture une batterie d'accumulateurs tout chargés qui alimente les lampes pendant la marche. C'est la solution la plus simple, et elle est particulièrement avantageuse lorsque les gares de départ possèdent une installation d'éclairage électrique; car les machines peuvent être utilisées pendant le jour à charger les accumulateurs.

Sur la ligne de New-York à Albany, où ce système a été expérimenté pour la première fois, chaque voiture renferme 24 lampes à incandescence de 16 bougies et une batterie de 60 accumulateurs Julien. Ces accumulateurs, dont le poids total est d'environ une tonne, sont divisés en deux groupes de 30 éléments, placés de chaque côté de la voiture et complètement indépendants l'un de l'autre; ils sont renfermés par six dans des caisses pourvues à l'intérieur de forts ressorts en laiton qui, lorsque les caisses sont en place, se touchent et établissent la communication entre les éléments. Les batteries sont reliées à un commutateur général pour l'allumage et l'extinction des lampes; celles-ci sont réparties sur deux circuits distincts, de manière qu'en cas d'accident à l'un des groupes d'éléments ou à l'un des circuits, les voyageurs ne se trouvent pas dans l'obscurité.

Lorsque le train arrive à Boston, il est remisé sur une voie de garage où sont établies des prises de courant pour relier la machine dynamo aux batteries; la charge a lieu sans qu'on ait besoin de déplacer celles-ci. Cette charge est suffisante pour alimenter les

lampes pendant douze heures, pour un parcours complet, aller et retour, de Boston à New-York.

On n'est pas encore fixé sur la dépense, mais on est porté à croire qu'elle n'atteindra pas cinq centimes par heure et par lampe, en comprenant les réparations, la surveillance et le renouvellement d'appareils, dans le cas où les accumulateurs dureraient deux ans. On compte environ 4500 francs pour l'installation complète d'une voiture. Cette dépense serait réduite de près de moitié si le trajet était organisé de manière à recharger les batteries au bout de six heures, car on pourrait alors employer moitié moins d'éléments.

Ligne de Stuttgard-Hall. — Sur la ligne wurtembergeoise, on se sert aussi d'accumulateurs pour alimenter les lampes, mais on les charge avec une dynamo placée dans le fourgon du train et mise en mouvement par l'essieu. De plus, pour rendre l'éclairage absolument indépendant des variations de vitesse du train, on emploie deux batteries distinctes, dont l'une fournit le courant aux lampes, tandis que l'autre est reliée à la dynamo. Chacune de ces batteries comprend 8 éléments et pèse environ 150 kilogrammes.

Le raccordement entre les wagons, nécessaire pour la charge des accumulateurs, se fait au moyen d'un joint analogue à celui du frein Westinghouse. Pendant la charge, les batteries des différentes voitures sont réunies en dérivation. Quand, par suite du ralentissement de la marche du train, la vitesse de la dynamo devient trop faible, la communication entre la dynamo et les accumulateurs est coupée par un interrupteur ; de plus, un régulateur maintient la valeur du courant constante pendant la charge indépendamment du nombre de tours de la machine. Nous allons décrire succinctement ces deux appareils, dont le principe peut être appliqué dans des installations où la vitesse de la dynamo est exposée à subir de grandes variations.

L'interrupteur automatique (fig. 194) se compose d'une bobine S à deux enroulements parcourus par le courant dans le même sens : l'un, à gros fil, se trouve sur le circuit principal ; l'autre, à fil fin, sur le circuit excitateur M de la dynamo. Le noyau K de cette bobine,

maintenu à sa partie supérieure par un contrepoids, est terminé par une fourche de contact en cuivre B, qui, lorsque le noyau est attiré, plonge dans deux godets à mercure C, C', en fermant le circuit de charge des accumulateurs A. Le contrepoids est réglé de façon à contre-balancer l'action de la bobine sur le noyau, tant que la différence de potentiel aux bornes de la dynamo n'est pas suffisante pour surmonter la force contre-électromotrice de la batterie secondaire.

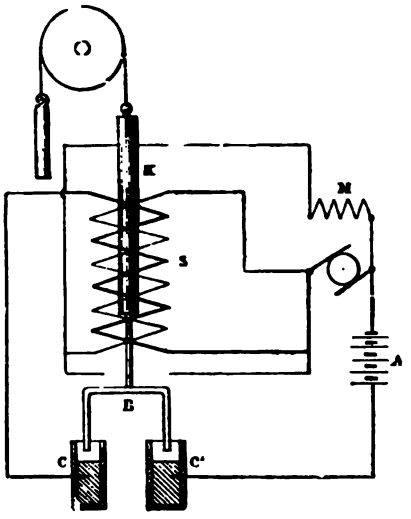


Fig. 194.

Quant au régulateur de courant (fig. 195), il comprend une bobine S placée dans le circuit principal. Le noyau K de cette bobine est suspendu à un arbre B, sur lequel sont disposées en hélice des saillies métalliques pouvant plonger dans des godets à

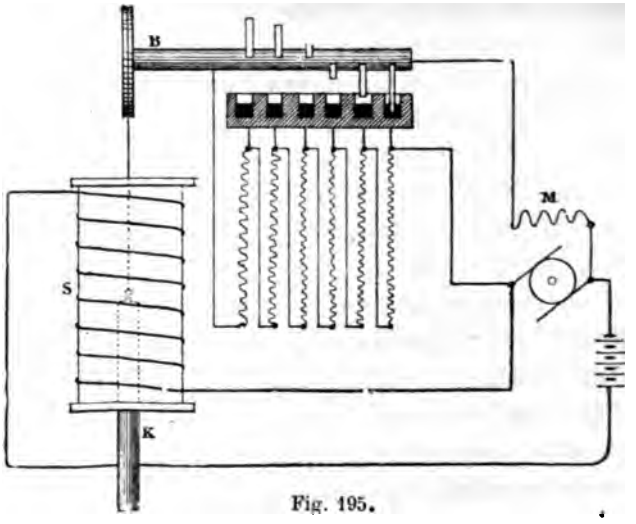


Fig. 195.

mercure suivant la position de l'arbre B. Ces godets correspondent à des résistances qui se trouvent intercalées sur le circuit

excitateur M en plus ou moins grand nombre, suivant que le noyau est plus ou moins attiré.

Chaque batterie peut alimenter pendant cinq heures les lampes dont les intensités lumineuses varient de 3 à 16 bougies. Ce temps écoulé, on la met en circuit avec la dynamo au moyen d'un commutateur à manivelle, et on la charge, pendant que l'autre batterie, qui vient d'être chargée, fournit à son tour le courant aux lampes.

Suivant un rapport de M. Ketter, professeur à l'Ecole polytechnique de Darmstadt, les dépenses d'installation de ce système d'éclairage varient, dans un train de 14 voitures, de 17 383 à 15 421 francs, suivant que l'éclairage comporte 63 lampes donnant ensemble 295 bougies, ou 39 lampes d'un pouvoir éclairant total de 193 bougies. Quant aux frais d'entretien, ils sont estimés, dans les mêmes conditions, à 1,01 et 0,38 centime par bougie et par heure.

297. Eclairage des mines. — La lumière électrique est appelée à rendre beaucoup de services dans les exploitations minières, non seulement pour l'éclairage des puits et des galeries souterraines où l'emploi des lampes à incandescence diminue les dangers d'accidents, mais encore dans les chantiers extérieurs où elle est économique en raison du prix peu élevé du combustible nécessaire à la production de la force motrice.

Les régulateurs à arc sont avantageux dans les cours et les puits, mais ils ne peuvent être adoptés dans les galeries où l'on a à craindre des explosions ; les lampes à incandescence seules conviennent dans ce cas. La dynamo est placée à l'extérieur, près de la machine à vapeur, et reliée aux lampes par des conducteurs qui descendent le long des puits. La pose de ces conducteurs exige d'assez grandes précautions afin qu'ils ne soient pas endommagés pendant le service.

Toutes les lampes alimentées par la dynamo doivent être à poste fixe ; la pratique de relier les lampes portatives aux conducteurs principaux est peu commode et dangereuse, car la mise en contact produit souvent une étincelle. Pour les foyers que les mineurs ont à leur disposition, on peut prendre des appareils

renfermant une lampe et une pile primaire ou secondaire, tels que ceux de Swan, Trouvé, Pitkin, Schanschieff, etc. Nous ne pouvons en donner la description qui sort des limites de notre ouvrage, et devons nous contenter de signaler leur existence.

La lumière électrique est actuellement installée dans un assez grand nombre de mines en Angleterre, en Ecosse et dans le pays de Galles.

298. Eclairage des navires. — Quand on a à installer un éclairage sur un navire, l'une des plus importantes considérations dont il faut tenir compte est celle de la sécurité, et l'on doit, avant tout, chercher à diminuer les risques d'incendie. Aucun système ne répond mieux à cette condition que la lumière électrique, et c'est là la principale raison pour laquelle celle-ci s'est développée d'une façon si rapide dans la marine.

Le prix de revient de la lumière est, dans ces conditions, une question secondaire, et les grandes Compagnies de navigation ne s'y arrêtent pas. Pour elles, la lumière électrique est tout à la fois une sécurité et un luxe, et elles sont décidées à la payer en conséquence ; leurs salons et leurs cabines sont beaucoup mieux éclairés, les passagers trouvent plus de confortable à bord et la surveillance de l'intérieur du bâtiment est beaucoup plus facile. Tous ces avantages compensent, à leur avis, le surcroît de dépenses qui peut se produire dans l'entretien, si toutefois il existe.

Quant à l'installation, elle n'est pas excessivement coûteuse. Sur un navire où il existe des chaudières et où l'on n'a rien à faire pour se procurer de la vapeur, on peut estimer à environ 200 francs par lampe à incandescence de 16 bougies la dépense de premier établissement ; ce prix comprend toute l'installation : machines à vapeur, tuyauterie, dynamos, canalisation électrique, lampes, supports de lampes, etc., etc.

Si, dans la marine marchande, la lumière électrique peut, malgré ses qualités, être considérée comme un luxe, elle devient une nécessité sur les bâtiments de guerre où les services qu'elle rend sont inappréciables. Avec elle, la surveillance s'étend partout sans difficulté : il n'existe plus de recoins obscurs ; les endroits où l'on ne pouvait anciennement introduire de lumière, comme la soute

à munitions, le puits des monte-charges, sont parfaitement éclairés, et l'on évite les dangers d'incendie qui résultaient constamment de l'emploi des bouts de bougie avec lesquels les matelots ne craignaient pas de pénétrer partout.

En résumé, le rôle de l'électricité à bord des navires de guerre et des grands paquebots de la marine marchande va se développant rapidement. Aujourd'hui, il n'est plus de bateau de guerre sans foyers électriques éclairant son intérieur, sans projecteurs illuminant ses abords ; non plus que de paquebot à passagers qui ne possède un éclairage électrique plus ou moins riche dans les salons, les cabines et la salle des machines, et des régulateurs à arc avec ou sans projecteur pour les embarquements ou les traversées du Canal de Suez et les entrées de port. Aussi les exemples d'installations ne manquent-ils pas ; nous citerons les éclairages exécutés par MM. Sautter, Lemonnier et Cie sur l'*Océanien*, de la Compagnie des Messageries maritimes, et sur le vaisseau cuirassé, *l'Indomptable*.

Eclairage de l'« Océanien ». — Cette installation comprend : 200 lampes à incandescence Edison de 12 bougies pour les salons, couloirs et cabines ; 21 lampes Woodhouse et Rawson de 20 bougies pour les grandes soutes à bagages et marchandises ; 3 lampes Woodhouse et Rawson de 40 bougies pour les feux de route et un régulateur Gramme de 150 carcels. Ce dernier, muni d'un réflecteur, peut être suspendu à l'extrémité d'une vergue afin d'éclairer les abords et le pont du bateau, soit pour un chargement ou un déchargement, soit pour toute autre opération nécessitant une lumière générale à l'extérieur.

Deux machines Gramme concourent à l'éclairage ; chacune d'elles est commandée directement par un moteur à grande vitesse du système Mégy, marchant à 750 tours par minute, et peut fournir un courant de 118 ampères, c'est-à-dire alimenter jusqu'à 180 lampes de 12 bougies, soit à peu près le nombre de lampes allumées en moyenne. Lorsque l'éclairage fonctionne au complet, les deux machines sont mises en mouvement ; puis, vers onze heures du soir, le nombre des lampes allumées étant inférieur à 155, une seule dynamo continue à marcher.

Les dynamos sont à double enroulement, de telle sorte que la différence de potentiel aux bornes reste constante, quelles que soient les variations de résistance du circuit extérieur, à la condition toutefois que la vitesse du moteur reste elle-même rigoureusement constante, résultat auquel on est arrivé au moyen d'un régulateur différentiel Mégy qui permet, malgré la variation de travail, d'obtenir une vitesse constante.

Deux circuits principaux, bâbord et tribord, alimentent les lampes des principales parties du bateau ; deux autres, moins importants, mais presque toujours en activité, éclairent la machine motrice, les tunnels et les chaufferies. Chaque compartiment du navire est éclairé à la fois par des lampes appartenant aux deux circuits de bâbord et de tribord, de manière à éviter une extinction totale. Enfin un tableau de distribution et plusieurs commutateurs permettent de disposer constamment de la lumière suivant les besoins.

Eclairage de l'« Indomptable ». — Dans les éclairages tels que celui dont nous venons de parler, les vitesses élevées données aux dynamos ont nécessité l'emploi de moteurs spéciaux, comme ceux de Brotherhood ou de Mégy. Pour répondre aux désirs de la marine militaire qui tenait à conserver les machines pilons dont elle se sert ordinairement et à leur faire commander directement les dynamos, MM. Sautter, Lemonnier et Cie ont combiné la disposition suivante qui a été montée à bord du cuirassé *l'Indomptable*.

Cette installation comprend deux ensembles, c'est-à-dire deux dynamos respectivement attelées à un moteur à vapeur ; chacun des deux ensembles doit donner normalement 150 ampères et 66 volts, avec une vitesse qui ne dépasse pas 350 tours. Les dimensions d'un ensemble sont : longueur, $3^m,40$; largeur, $0^m,80$; hauteur, $1^m,60$; poids, 3 200 kilogrammes.

La dynamo Gramme est du type *duplex*, c'est-à-dire à deux paires de pôles. Le champ magnétique est créé par une chaîne continue de quatre électro-aimants à âmes en fer doux s'assemblant et se fermant l'un sur l'autre ; ces électros sont à double enroulement. Des facilités particulières sont données pour le démontage ; toute la partie supérieure de la dynamo peut s'enlever de

manière à permettre en quelques instants le remplacement de l'arbre et de sa bobine. Cette dynamo, à la vitesse de 350 tours, peut débiter, avec une différence de potentiel constante aux bornes de 66 volts, depuis 1 jusqu'à 150 ampères, et alimenter depuis 1 jusqu'à 225 lampes de 10 bougies, le travail absorbé variant proportionnellement au nombre de lampes allumées.

Le moteur du type pilon est à deux cylindres compound, fonctionnant à volonté avec échappement à air libre ou à condensation ; il a une puissance normale de 20 chevaux effectifs à 3 kilogrammes de pression. Afin de réduire le poids au minimum, les cylindres et le bâti seuls sont en fonte ; tous les autres organes en bronze ou en acier. Les organes sont bien en vue et facilement accessibles même pendant la marche ; la distribution est faite dans le grand cylindre par un seul tiroir et dans le petit cylindre par un tiroir double à détente variable ; on peut ainsi, avec un réglage convenable, fonctionner toujours dans les conditions les plus économiques de consommation de vapeur, soit à condensation, soit à échappement libre. Le régulateur de vitesse est particulièrement sensible ; il est, de plus, disposé de telle sorte que, pendant la marche, on peut faire varier l'allure normale du moteur.

Le moteur et la dynamo sont montés dans le prolongement l'un de l'autre sur un châssis commun en fer à double T qui sert en même temps de bâti aux organes de la dynamo. L'accouplement est fait par un manchon flexible à ressorts, entièrement métallique, dispensant de prendre, au montage à bord, les précautions minutieuses qu'exigerait un accouplement rigide.

Un de ces ensembles est une unité d'éclairage convenable pour les navires de guerre, croiseurs ou cuirassés. Chacun d'eux peut normalement alimenter 225 lampes à incandescence de 10 bougies ; ou 4 projecteurs[1] de 1 600 becs ; ou 8 projecteurs de 500 becs : avec facilité de substituer un projecteur de 1 600 becs à une soixantaine de lampes de 10 bougies ; et un projecteur de 500 becs

[1] Les *projecteurs* sont formés d'un régulateur à arc, dit *lampe à main*, dans lequel les charbons sont réglés simplement à la main, sans aucun appareil mécanique comme ceux que nous avons décrits. Cette lampe est placée dans un projecteur Mangin.

à une trentaine de lampes de 10 bougies. Chaque ensemble doit donner normalement 150 ampères et 66 volts avec une vitesse ne dépassant pas 350 tours.

MM. Sautter, Lemonnier et Cie ont enfin cherché à protéger le navire contre les torpilleurs par une ceinture continue d'éclairage; dans ce but, ils ont adjoint aux projecteurs de grande intensité destinés à fouiller l'horizon et à porter au loin un faisceau concentré, des projecteurs moins puissants, mais plus nombreux et à grande divergence horizontale. Un des ensembles de l'*Indomptable* peut alimenter 8 projecteurs de 0m,40 de diamètre avec 45° de divergence, c'est-à-dire éclairer tout l'horizon, pendant que l'autre illumine les 225 lampes d'éclairage intérieur : en raison de leur identité, l'un peut se substituer à l'autre dans un de ces services si différents.

Navigation de nuit dans le canal de Suez. — En cours de navigation, l'usage de la lumière électrique pour éclairer et scruter l'horizon est plutôt nuisible, car le grand éclat du faisceau lumineux éblouit la vue ; au contraire, elle est fort avantageuse pour éclairer un point déjà trouvé et en voir les détails, par exemple pour faciliter l'entrée de nuit dans une passe, pour éclairer les détails de la côte ou les bouées dont on sait à peu près la position.

Les services que la lumière électrique peut rendre dans des circonstances de ce genre sont mis en évidence au canal de Suez, où les vaisseaux pourvus de foyers à arc ont été autorisés à marcher de nuit, à partir du 1er décembre 1885 entre Port-Saïd et le kilomètre 54, ce qui leur permet de gagner dix-huit à vingt heures sur le temps moyen nécessaire au trajet.

Pour les parties droites, la direction à suivre est indiquée au moyen de deux feux fixes établis par la Compagnie : des bouées lumineuses marquent les passes. C'est dans les courbes que la lumière électrique trouve surtout son application.

Chaque navire doit être muni des appareils suivants imposés par le règlement :

1° A l'avant, un projecteur électrique d'une portée de 1 200 m.;

2° A l'arrière, une lampe électrique capable d'éclairer un champ circulaire de 200 à 300 mètres de diamètre ;

3° Sur chaque flanc, une lampe électrique avec réflecteur.

Le projecteur de l'avant permet de distinguer si la voie est libre; en outre, il rend visibles les berges et les bouées, ce qui est utile surtout dans les courbes. Les lumières des flancs et de l'arrière éclairent les bouées de bâbord et de tribord en même temps que les berges à l'arrière, et renseignent le pilote sur la position de l'arrière.

La plupart des vaisseaux de guerre et des bâtiments postaux possèdent une installation d'éclairage électrique et remplissent les conditions imposées ci-dessus. Dans le cas contraire, les navires peuvent employer des appareils amovibles qu'ils embarquent à leur entrée à Port-Saïd ou à Suez, et qu'ils débarquent à l'autre extrémité du canal.

Cette installation comporte une dynamo Gramme à enroulement compound produisant 70 volts et 75 ampères (45 pour le projecteur avant, 8 pour chaque côté et 14 pour le feu d'arrière). La dynamo est commandée par un moteur Brotherood assemblé sur le même bâti qu'elle.

La distribution électrique se fait par quatre dérivations convenablement calculées pour que chaque foyer reçoive la quantité d'électricité qui lui est nécessaire. Un tableau de distribution commande tous ces appareils ; il s'installe sur la passerelle à côté du pilote. Celui-ci est en communication constante, par un téléphone, avec l'homme qui manœuvre le projecteur de l'avant, et il peut disposer des feux d'arrière, de tribord et de bâbord par un commutateur.

Le projecteur de l'avant est placé à 3 mètres au-dessus du niveau de l'eau sur un plancher mobile installé au-devant de l'étrave, sur lequel se tient l'homme chargé de conduire la lampe à main et de faire varier la direction du faisceau à la demande du pilote.

Le feu de l'arrière est fourni par une lampe renfermée dans une lanterne suspendue à 3 mètres au-dessus de l'eau ; une disposition convenable permet de braquer le faisceau lumineux dans une direction voulue. Les feux de côté sont disposés comme celui d'arrière.

Signaux de nuit, système de Méritens. — L'électricité est encore

utilisée dans la production des signaux de nuit. Voici le système proposé à cet effet par M. de Méritens.

Les dix fanaux, que l'on hisse le long d'une vergue dans la marine française, sont remplacés par dix lampes à incandescence qu'on allume ou qu'on éteint au moyen d'un commutateur à touches. Cet appareil est pourvu de douze bornes; le courant arrive à la borne extrême de droite, et s'en va par celle de gauche qui reçoit aussi les fils de retour des dix lampes, les fils d'aller étant respectivement reliés aux dix bornes intermédiaires. On met en circuit les lampes qui doivent fonctionner pour transmettre le signal voulu en pressant sur autant de boutons correspondants; puis on les allume ou on les éteint toutes à la fois au moyen de deux boutons spéciaux désignés « allumé » et « éteint ». Les lampes non allumées sont remplacées dans le circuit par des résistances équivalentes.

299. Eclairage électrique des habitations particulières. — Lorsqu'il n'est pas fourni par des stations centrales, l'éclairage électrique des habitations peut être produit de deux façons différentes, avec des machines ou des piles : avec des machines, quand l'installation est assez importante, ce qui arrive d'ailleurs rarement; avec des piles, dans les autres circonstances. Mais, quel que soit le système adopté, on ne peut plus chercher à réaliser une économie sur l'éclairage au gaz. Les frais de premier établissement sont toujours considérables par rapport aux faibles résultats obtenus, et le nombre d'heures pendant lesquelles la lumière est nécessaire n'est pas suffisant pour compenser le surcroît de dépenses qui provient de ce chef; de plus, l'entretien coûte cher, surtout avec les piles. Il faut donc, dans ce genre d'installations, considérer l'éclairage électrique comme un luxe et se décider à le payer comme tel.

Eclairage par machines. — L'éclairage de l'hôtel de M. Edmond de Rothschild, à Paris, nous paraît pouvoir être cité comme un exemple fort bien compris de ce genre d'installations.

La force motrice, que les dispositions du local empêchent de demander à une machine à vapeur (ce qui arrive presque toujours

dans une habitation particulière), est fournie par un moteur à gaz à deux cylindres. Celui-ci commande une dynamo Edison de 60 lampes qui peut, si l'on veut, être mise directement sur les lampes à incandescence; mais, en général, elle sert à charger une batterie d'accumulateurs Faure-Volckmar. La raison en est facile à comprendre.

Dans une installation semblable, les lampes n'ont pas à fonctionner simultanément, sauf pendant les grandes réceptions, et en temps normal, le nombre de lampes en service varie constamment. Avec l'alimentation directe, la machine consomme toujours plus de force qu'il n'est nécessaire. Avec les accumulateurs, la dépense est au contraire proportionnée aux besoins de l'éclairage, et l'économie ainsi réalisée compense amplement les pertes occasionnées par l'usage d'une batterie secondaire, bien que le rendement de celle-ci ne soit, comme nous l'avons dit, que d'environ 60 p. 100.

La batterie se compose de 60 accumulateurs que l'on charge pendant la journée et qui fournissent le soir le courant électrique suivant les besoins du service. Ces éléments ont une capacité de 500 ampères-heure et leur régime de charge varie entre 27 et 30 ampères. Au début de la décharge, 56 éléments suffisent pour l'alimentation des lampes; les 4 autres sont gardés en réserve et on les ajoute au fur et à mesure de la durée de l'éclairage.

Nous devons ajouter qu'une pareille disposition permet, au cas échéant, de doubler le nombre de lampes en service. Pour une fête, un grand bal, par exemple, on peut mettre à la fois en circuit la dynamo et la batterie et l'on se trouve en état de produire, avec une machine assez faible, une quantité de lumière considérable.

La différence de potentiel aux bornes de la dynamo est donnée par un voltmètre Deprez-Carpentier; un régulateur à manette est destiné, comme dans les applications citées précédemment, à faire varier l'intensité du champ magnétique de la machine.

Cet éclairage présente donc toutes les conditions qui peuvent assurer son bon fonctionnement et sa commodité ; il montre les services que rendent les accumulateurs, lorsqu'on sait les

employer judicieusement et quand on ne leur demande pas plus qu'ils ne peuvent donner : en pareil cas ils sont, à notre avis, d'un emploi indispensable.

Il nous paraît aussi utile de signaler l'avantage qu'il y aurait dans une semblable installation à se servir d'un compteur électrique. Il est, en effet, assez important que l'employé chargé de la marche du moteur puisse se rendre compte chaque matin de la quantité d'électricité fournie la veille par les accumulateurs, et cela, afin qu'il sache pendant combien de temps il doit charger sa batterie. Un compteur, tel que l'appareil de M. Cauderay, pourrait donc être utilement employé, surtout s'il était gradué en lampes-heure. En lisant l'indication du compteur et en se reportant à un tableau dressé à l'avance, l'employé aurait, sans aucun calcul, les renseignements dont il a besoin, et pourrait maintenir les accumulateurs à leur charge maxima, tout en opérant avec la plus stricte économie. C'est là le complément nécessaire de l'installation.

Éclairage par piles. — L'éclairage domestique est encore plus coûteux par les piles que par les machines. Aussi, pour le moment, ne nous paraît-il pas susceptible d'être appliqué.

Quand il s'agit d'un éclairage momentané, comme pour un bal ou une salle de réunion, la solution la plus commode est fournie par les accumulateurs. Ces appareils sont amenés tout chargés pour la circonstance, et le lendemain on les remporte à l'usine qui les a fournis avec tout le matériel d'éclairage provisoire.

Pour un service continu, la véritable solution de l'éclairage domestique réside actuellememt dans la distribution du courant par les stations centrales, que nous étudierons plus loin.

PRIX DE REVIENT DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Il est à peu près impossible d'établir une formule donnant à priori le prix de revient de l'éclairage électrique ; celui-ci dépend en effet d'une foule de circonstances, telles que l'aména-

gement et la disposition des locaux à éclairer, le système de lampes adopté, l'importance de l'installation, le nombre d'heures de l'éclairage, la nature de la force motrice, etc., qui peuvent le modifier considérablement.

En entreprenant cette étude, notre but est seulement d'indiquer quelques données générales, sur lesquelles un industriel pourra se baser pour examiner un projet et pour voir dans quels cas il aura avantage à établir l'éclairage électrique.

Le prix de revient comporte : 1° les dépenses de premier établissement; 2° les frais d'entretien.

300. Dépenses de premier établissement. — En se plaçant dans le cas le plus général où l'on n'utilise pas une chute d'eau et où l'on établit un moteur à vapeur spécial pour l'éclairage électrique, les dépenses de premier établissement comprennent la machine motrice, avec ses fondations et sa chaudière, la dynamo, les conducteurs, les foyers lumineux et l'appareillage.

On peut remplacer quelquefois la machine à vapeur par un moteur à gaz ; on peut encore adjoindre à l'installation une batterie d'accumulateurs, toutes circonstances qui modifient les dépenses. Mais ce sont là des cas plutôt exceptionnels que nous ne pouvons étudier ici : le calcul se fait d'ailleurs comme ceux que nous donnons ci-dessous.

Nous n'avons pas à indiquer le système de moteur ni le genre de chaudière à employer : ces questions sont étrangères à notre programme. Nous n'examinerons la force motrice qu'au point de vue de son prix, et nous admettrons comme moyenne les chiffres suivants.

Prix d'une machine à vapeur à condensation avec chaudière et mise en place :

5 chevaux.	6 000 francs.
10 —	8 000 —
20 —	14 000 —
50 —	25 000 —
75 —	35 000 —
100 —	40 000 —

Les prix des dynamos et des lampes sont ceux fournis par

les différents constructeurs, et sont, par suite, essentiellement variable.

Le tarif suivant de conducteurs, que nous citons comme exemple, est adopté par M. Gramme :

SECTIONS en millimètres carrés.	PRIX EN FRANCS PAR MÈTRE			
	ISOLEMENT léger.	ISOLEMENT moyen.	ISOLEMENT fort.	ISOLEMENT sous plomb.
1	0,17	0,26	0,37	0,72
2	0,23	0,29	0,42	0,92
5	0,38	0,50	0,68	1,43
10	0,60	0,81	1,07	1,98
20	1,10	1,43	1,82	3,13
30	1,61	2,08	2,60	3,92
40	2,13	2,73	3,38	4,55
50	2,60	3,38	4,17	5,22
100	5,20	6,63	8,06	8,45
150	7,47	9,49	11,05	11,32
200	9,75	12,35	13,65	14,30
250	12,02	14,69	15,60	16,90
300	14,30	16,90	17,87	19,50

Les fils nus en cuivre rosette de haute conductibilité coûtent environ 2 fr. 50 le kilogramme.

L'appareillage comprend tous les accessoires d'une installation de lumière : lustres, appliques, abat-jour, isolateurs, crochets, moulures, etc. Il est impossible de donner à cet égard même un aperçu des dépenses. On peut dans les autres questions établir quelques limites, parce qu'il existe des règles théoriques auxquelles on doit s'astreindre ; mais là la fantaisie est le seul guide. C'est une question que le lecteur devra apprécier par lui-même. Du reste, notre but étant plutôt d'établir des rapports que des chiffres absolus, nous prendrons pour les frais d'appareillage un chiffre moyen qui ne figurera dans les calculs que pour mémoire.

Rappelons seulement qu'une installation complète comporte : un ampèremètre, un voltmètre, un compteur de tours, des coupe-circuits, et des commutateurs.

301. Frais d'entretien. — Les frais d'entretien comprennent :

1° Combustible, graissage ;

2° Main-d'œuvre ;

3° Consommation des foyers lumineux ;

4° Amortissement du matériel et intérêt du capital engagé.

On peut compter qu'une machine à vapeur à condensation placée dans de bonnes conditions dépense *pratiquement* en moyenne 1 kil. 3 de charbon par cheval-heure (mesuré sur les pistons). Une bonne machine ayant en moyenne un rendement de 0,75, la dépense est de 1 kil. 75 par cheval-heure mesuré sur l'arbre.

En admettant le prix de 30 francs les 1 000 kilogrammes de charbon, la dépense par cheval-heure est 0 fr. 053. Le graissage et les frais divers étant comptés environ pour 0 fr. 017, le prix du cheval-heure est 0 fr. 070.

Nous rappelons que, dans chaque cas particulier, la dépense en charbon dépend des éléments suivants : machine à condensation ou sans condensation, importance et système de la machine, prix du combustible et de l'eau, etc.

On peut évaluer la dépense en main-d'œuvre à 5 p. 100 du capital engagé, aussi bien pour l'éclairage à arc que pour celui à incandescence ; le travail occasionné par le renouvellement des crayons dans le premier cas étant compensé par la plus grande facilité de surveillance qui résulte avec l'arc de l'emploi d'un plus petit nombre de foyers lumineux.

La durée généralement admise aujourd'hui pour les lampes à incandescence de 8 et de 16 bougies est 1 000 heures. Le prix de ces lampes étant 5 francs, la dépense de renouvellement s'élève par heure à 0 fr. 005.

Les bougies Jablochkoff coûtent 0 fr. 20, et elles durent une heure et demie, soit une dépense par heure de 0 fr. 133.

Les crayons de 12 millimètres de diamètre destinés aux régulateurs de 100 à 150 becs se vendent 1 fr. 20 le mètre. L'usure est environ de 80 millimètres par heure pour les deux crayons, soit une dépense de 0 fr. 10. Pour les régulateurs de 45 carcels, on emploie des crayons de 8 à 10 millimètres, coûtant à peu près 1 franc le mètre ; la dépense est dans ce cas d'environ 0 fr. 08.

Pour les lampes à incandescence de grande intensité lumineuse

les prix et les durées ne sont plus conformes aux chiffres ci-dessus. Il en est de même pour le prix et l'usure des charbons destinés aux régulateurs d'intensités différentes. Mais pour simplifier la question nous avons cherché autant que possible à nous rapprocher de la moyenne. Les appareils que nous prenons comme exemples sont les plus usités en pratique.

Nous admettrons, en outre, 10 p. 100 du capital engagé pour l'amortissement et 5 p. 100 pour l'intérêt annuel.

Ces bases étant établies, nous allons calculer théoriquement le prix de revient de l'heure d'éclairage dans quelques cas particuliers. Nous établirons ensuite la comparaison de ces prix avec ceux que nécessiterait l'emploi du gaz.

302. Premier exemple. — Supposons qu'on veuille installer 200 lampes Edison de 16 bougies sur deux circuits présentant chacun une longueur totale, aller et retour, de 400 mètres.

Ces lampes exigent 100 volts et 0,7 ampère et sont toutes placées en dérivation, de telle sorte que la dynamo devra donner une intensité de 140 ampères. Chaque circuit sera parcouru par 70 ampères.

Prix de l'installation. — En comptant sur 8 lampes par cheval, il faut une machine à vapeur de 25 chevaux qui, mise en place, coûte 17 000 francs avec la chaudière.

La dynamo revient à environ 3 000 francs, et, comme il faut en avoir une de rechange, la dépense de ce chef s'élève à 6 000 francs.

Les appareils du tableau de distribution, comprenant un régulateur de champ magnétique, 1 commutateur pour mettre la machine de rechange en service, 2 interrupteurs, 1 voltmètre, 1 ampèremètre et deux coupe-circuits, coûtent environ 450 francs.

En s'imposant comme limite maximum 2 ampères par millimètre carré, le tableau (p. 359) nous indique un conducteur de 7,5 millimètres de diamètre. Adoptons ce chiffre. La résistance est $0,00036 \times 400 = 0,14$ ohm, et la perte en volts est $0,14 \times 70 = 9,8$ volts, soit moins de 10 p. 100; ce diamètre est donc admissible. La dynamo doit fournir 110 volts.

Si nous prenons le fil indiqué dans le tarif de M. Gramme comme ayant 50^{mm^2}, avec un isolement moyen, le prix, qui est de 3 fr. 38 par mètre, sera de 2 700 francs pour les deux circuits.

Supposons que la dérivation de chaque lampe ait en moyenne 10 mètres de longueur, aller et retour compris, et adoptons pour ces dérivations un fil de 2^{mm^2} de section avec isolement moyen, du prix de 0 fr. 29 le mètre. Le prix total des dérivations sera de $200 \times 0{,}29 \times 10 = 580$ francs.

Admettons enfin que l'appareillage de chaque lampe coûte 20 francs.

Nous arrivons ainsi à établir les frais de premier établissement de la manière suivante :

Machine à vapeur	17 000 francs.
2 dynamos, dont 1 de rechange.	6 000 —
Tableau de distribution	450 —
Conducteur principal.	2 700 —
Conducteurs des dérivations	580 —
200 lampes à 5 francs	1 000 —
Appareillage.	4 000 —
Imprévus.	270 —
TOTAL.	32 000 francs.

Frais d'entretien. — Supposons qu'il s'agisse d'un éclairage fonctionnant en moyenne 4 heures par jour pendant 300 jours par an, les frais d'entretien peuvent s'évaluer ainsi qu'il suit :

Combustible et graissage 0 fr. 07 × 25 × 1 200 . . .	2 100 francs.
Renouvellement des lampes 0 fr. 005 × 1 200 × 200 .	1 200 —
Main-d'œuvre 5 p. 100 du capital.	1 600 —
Intérêt 5 p. 100 —	1 600 —
Amortissement 10 p. 100 —	3 200 —
Imprévus.	300 —
TOTAL. . .	10 000 francs.

Le prix de revient de la lampe-heure est donc de :

$$\frac{10\,000}{1\,200 \times 200} = 0 \text{ fr. } 0416.$$

303. Deuxième exemple. — Il s'agit d'établir 20 bougies Jabloch-

koff de 4 millimètres sur 4 circuits alimentés par la même machine et présentant chacun une longueur totale de 500 mètres, aller et retour compris.

Prix de l'installation. — Chaque bougie exigeant 1 cheval, la machine à vapeur devra développer 20 chevaux et coûtera environ 14 000 francs.

Comme dynamos, on prendra 3 machines Gramme à courants alternatifs de 10 bougies chacune, dont 1 de rechange, qui coûteront ensemble 7 500 francs.

Le tableau de distribution, comprenant 1 rhéostat, 1 commutateur pour la dynamo de rechange, 1 ampèremètre, 4 coupe-circuits, 4 interrupteurs, reviendra à environ 250 francs.

Chaque bougie exigeant 42 volts à ses bornes, et les 5 bougies de chaque circuit étant en série, la tension nécessaire est 210 volts. L'intensité du courant est de 8 ampères.

En s'imposant 2 ampères par millimètre carré comme limite maximum, la table nous indique 2,5 millimètres pour le diamètre. La résistance du conducteur est $0,00325 \times 500 = 1,265$ ohm, et la perte en volts est 13 volts, que l'on peut admettre, car elle n'atteint pas 10 p. 100.

Le fil de $2^{mm},5$ à isolement léger, coûte 0 fr. 38 le mètre. Comme il faut 4 circuits de 500 mètres, soit 2 000 mètres, le prix du conducteur sera de 760 francs.

L'appareillage, comprenant 1 chandelier commutateur et 1 globe, etc., s'élève à environ 70 francs par foyer. La dépense sera de 1 400 francs pour les 20 foyers.

Les frais d'installation s'établissent comme il suit :

Machine à vapeur.	14 000 francs.
3 machines dynamos dont une de rechange.	7 500 —
Tableau de distribution.	250 —
Conducteurs.	760 —
Appareillage.	1 400 —
Imprévus.	390 —
TOTAL. . . .	24 300 francs.

Frais d'entretien. — Nous supposons toujours une durée d'éclai-

rage de quatre heures par jour pendant 300 jours par an. Les dépenses d'entretien sont alors de :

Combustible et graissage 0 fr. 07 × 20 × 1 200 .	1 680 francs.
Dépense de bougies 0 fr. 133 × 20 × 1 200 . . .	3 192 —
Main-d'œuvre, 5 p. 100 du capital	1 215 —
Intérêt, 5 p. 100 —	1 215 —
Amortissement, 10 p. 100 —	2 430 —
Imprévus.	268 —
TOTAL.	10 000 francs.

Le prix de revient de la bougie-heure est de $\frac{10,000}{1\,200 \times 20} = 0$ fr. 42.

304. Troisième exemple. — L'installation comporte 5 régulateurs Cance de 7 ampères, et 80 lampes à incandescence Swan de 16 bougies de 65 volts et 0,98 ampère.

Les régulateurs sont respectivement placés sur 5 circuits ayant une longueur moyenne de 200 mètres aller et retour, les lampes à incandescence sur un seul circuit ayant une longueur totale de 180 mètres.

Prix de l'installation. — La machine à vapeur doit développer 15 chevaux, dont 5 pour les régulateurs et 10 pour les lampes à incandescence. Elle coûtera environ 12 000 francs.

Le courant devra avoir une différence de potentiel aux bornes de 70 volts et une intensité totale de $5 \times 7 + 80 \times 0,98 = 114$ ampères. On prendra deux dynamos Gramme n° 4, dont une de rechange, qui coûtent ensemble 3 400 francs.

Le tableau de distribution coûtera 350 francs pour les 5 régulateurs Cance, y compris un rhéostat à curseur, un commutateur, un indicateur de marche et un coupe-circuit par lampe ; en y ajoutant un interrupteur et un coupe-circuit pour les lampes à incandescence, un voltmètre et un ampèremètre, on arrive à un total d'environ 600 francs.

On trouve, comme précédemment, que les conducteurs pour régulateurs à arc devront avoir 5^{mm2} de section ; ils coûteront, à isolement moyen, 0 fr. 50 le mètre ; soit, pour les 5 lampes, $0,50 \times 5 \times 200 = 500$ francs.

Les lampes à incandescence exigeant 65 volts et la machine en

donnant 70, la perte de charge dans les conducteurs ne devra être que de 5 volts. Un conducteur de 50^{mm2} de section satisfera à cette condition ; sa résistance par mètre est 0,000318, soit 0,057 pour 180 mètres.

La perte en volts est $0,057 \times 80 \times 0,98 = 4,43$. Les conducteurs principaux coûteront, à isolement moyen, 3 fr. 38 le mètre; d'où une dépense de 608 francs.

Les conducteurs de dérivation coûteront, comme dans le premier exemple cité plus haut, 0 fr. 29 le mètre, soit, pour l'ensemble, 0 fr. $29 \times 10 \times 80 = 232$ francs.

L'appareillage peut être estimé à 80 francs par régulateur Cance.

En ajoutant à ces chiffres le prix des lampes et de l'appareillage à incandescence, on arrive à résumer comme suit les dépenses d'installation :

Machine à vapeur	12 000 francs.
2 dynamos dont 1 de rechange	3 400 —
Tableau de distribution	600 —
Conducteurs pour régulateurs à arc	500 —
— principaux pour incandescence	608 —
Dérivations pour incandescence	232 —
5 régulateurs à arc à 280 francs	1 400 —
80 lampes à incandescence à 5 francs	400 —
Appareillage des régulateurs à arc 80×5	400 —
— lampes à incandescence 20×80	1 600 —
Imprévus	460 —
TOTAL	21 600 francs

Frais d'entretien. — Ils peuvent s'établir de la manière suivante, en considérant toujours un éclairage de 1 200 heures par an :

Combustible et graissage, 0 fr. $07 \times 15 \times 1\,200$	1 260 francs.
Crayons des régulateurs à arc, 0 fr. $08 \times 5 \times 1\,200$	480 —
Renouvellement des lampes à incandescence, 0 fr. 0065 $\times 1\,200 \times 80$	624 —
Main-d'œuvre, 5 p. 100 du capital	1 080 —
Intérêt, 5 p. 100 —	1 080 —
Amortissement, 10 p. 100 —	2 160 —
Imprévus	316 —
TOTAL	7 000 francs.

En répartissant cette dépense proportionnellement à la force

motrice absorbée par les régulateurs à arc et par les lampes à incandescence, on arrive par heure à :

$$\frac{7\,000 \times 5}{15} \times \frac{1}{5 \times 1\,200} = 0 \text{ fr. } 39 \text{ par régulateur à arc ;}$$

$$\frac{7\,000 \times 10}{15} \times \frac{1}{80 \times 1\,200} = 0 \text{ fr. } 048 \text{ par lampe à incandescence.}$$

305. Variation du prix de revient avec la durée de l'éclairage. — En se reportant aux exemples que nous venons de citer, on peut constater que l'amortissement du matériel et l'intérêt du capital engagé entrent pour une très grande part dans le prix de revient de la lumière électrique. On a donc intérêt à augmenter autant que possible le nombre d'heures de l'éclairage.

Pour montrer dans quelles proportions cet élément peut influencer le résultat définitif, reprenons les calculs que nous avons faits précédemment, en diminuant la durée de l'éclairage et la portant à 600 heures par an :

	1er EXEMPLE	2e EXEMPLE	3e EXEMPLE
Combustile et graissage.	1 050	840	630
Crayons des lampes à arc ou bougies Jablochkoff.	»	1 596	240
Renouvellement des lampes à incandescence. .	600	»	624
Main-d'œuvre.	1 600	1 215	1 080
Intérêt.	1 600	1 215	1 080
Amortissement.	3 200	2 430	2 160
Imprévus.	250	704	186
TOTAUX. . . .	8 300	8 000	6 000

Avec une durée de 1 200 heures d'éclairage, les frais d'entretien s'élevaient dans les trois cas à 10 000, à 10 000 et à 7 000 francs. On voit qu'en réduisant la durée du service de moitié, les dépenses sont loin de diminuer dans la même proportion.

Il résulte de là que la lumière électrique n'est véritablement économique que dans les locaux où l'éclairage atteint pendant l'année un nombre d'heures assez élevé.

306. Comparaison avec le prix de l'éclairage au gaz. — Pour comparer les prix de revient de la lumière électrique et du gaz, il faut

compter qu'une lampe à incandescence de 16 bougies équivaut à deux becs ordinaires de 1 carcel, dépensant chacun 140 litres à l'heure; et qu'une bougie Jablochkoff ou un régulateur à arc de 45 carcels correspond à deux becs régénérateurs, du type Wenham, par exemple, brûlant chacun environ 700 litres à l'heure pour une intensité lumineuse de 20 carcels.

On peut évaluer à 25 francs la dépense d'installation d'un bec de gaz ordinaire et à 300 francs celle d'un bec Wenham de 20 carcels.

En reprenant les trois exemples cités ci-dessus, les frais de premier établissement s'élèveraient donc :

Dans le premier cas à 25 fr. $\times$ 200 $\times$ 2 = 10 000
Dans le deuxième cas à 300 fr. $\times$ 20 $\times$ 2 = 12 000
Dans le troisième cas à 25 fr. $\times$ 80 $\times$ 2 + 300 fr. $\times$ 5 $\times$ 2 = 7 000

Les dépenses d'entretien seraient par suite pour une durée de 1 200 heures d'éclairage, en prenant le prix du gaz à Paris, soit 0 fr. 30 le mètre cube :

	1er EXEMPLE	2e EXEMPLE	3e EXEMPLE
Gaz consommé.	20 160	10 080	10 584
Main-d'œuvre	1 200	600	1 000
Intérêt 5 p. 100 du capital.	500	600	350
Amortissement 10 p. 100 du capital.	1 000	1 200	700
Imprévus.	140	120	166
TOTAUX. . . .	23 000	12 600	12 800

La dépense est donc beaucoup plus considérable avec le gaz. Mais la différence entre les deux prix de revient diminue si l'on réduit le nombre d'heures de l'éclairage; car, contrairement à ce que nous venons de dire pour la lumière électrique, l'intérêt et l'amortissement sont à peu près insignifiants avec le gaz, la principale dépense provenant de la consommation même du gaz.

Le fait est facile à mettre en évidence si l'on établit les calculs précédents pour une durée de 600 heures ; on arrive ainsi aux résultats suivants :

	1er EXEMPLE	2e EXEMPLE	3e EXEMPLE
Gaz consommé	10 080	5 040	5 297
Main-d'œuvre	1 200	600	1 000
Intérêt 5 p. 100 du capital	500	600	350
Amortissement 10 p. 100 du capital	1 000	1 200	700
Imprévus	220	60	153
TOTAUX	23 000	7 500	7 500

Il peut même arriver, si la durée de l'éclairage est suffisamment faible, que le gaz devienne plus économique que la lumière électrique : les calculs précédents permettent de s'en rendre compte.

Avant de terminer, nous croyons devoir rappeler de nouveau que les chiffres établis plus haut sont purement théoriques. Ils doivent simplement servir à donner une idée générale de la question et à indiquer à un industriel la manière dont il peut établir un devis.

Dans la pratique, il se présente de nombreuses circonstances qui peuvent modifier sensiblement les dépenses.

Ainsi nous avons supposé que l'installation électrique était créée de toutes pièces, que les chaudières, les machines étaient établies pour l'éclairage seulement. Dans bien des cas, un industriel n'aura pour commander sa dynamo qu'à placer une courroie sur un arbre de transmission déjà existant ; les frais d'installation seront alors réduits en conséquence, et l'on n'aura guère à compter que la consommation de charbon. D'autres fois, lorsqu'on trouvera dans une usine une force motrice naturelle, comme une chute d'eau, l'économie sera encore plus grande.

Nous le répétons donc, les calculs précédents ne sont destinés qu'à faire ressortir les différents éléments qui constituent le prix de revient ; mais il ne faudrait pas les accepter d'une façon absolue pour l'établissement d'un devis.

Pour résumer tout ce que nous avons développé précédemment sur cette question, nous croyons pouvoir dire que l'éclairage électrique possède des avantages sérieux pour un industriel, chaque fois qu'il fonctionne avec un nombre de foyers assez considérable et pendant un nombre d'heures assez grand pour réduire les frais d'amortissement supportés par chaque lampe. Dans ce cas, il pourra même y avoir intérêt à établir des chaudières, des machines à vapeur, uniquement pour la production de l'électricité.

Pour une petite installation comprenant peu de foyers et travaillant un nombre d'heures restreint, la lumière électrique ne sera économique que dans le cas où l'on se servira de moteurs déjà existants.

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LES STATIONS CENTRALES

307. — Pour obtenir de l'électricité tous les services qu'elle peut rendre, il ne suffit pas de l'appliquer dans des installations isolées; on doit au contraire chercher à la mettre à la disposition de tous et à la distribuer à domicile comme le gaz.

C'est à ce but que sont destinées les stations centrales. Etablies en un point quelconque d'une ville, elles produisent le courant et le distribuent à l'aide de conducteurs métalliques chez les habitants, qui l'utilisent soit à la production de l'éclairage, soit à celle de l'énergie mécanique, en appliquant dans ce dernier cas la transmission de la force par l'électricité que nous étudierons dans le chapitre suivant.

La condition essentielle d'une distribution est une indépendance absolue. Il faut pouvoir fournir le courant électrique à un certain nombre d'appareils de nature différente, de façon que chacun d'eux reçoive la quantité d'énergie qui lui est nécessaire. L'installation de l'usine centrale doit donc être prévue pour le cas du débit maximum où tous les appareils fonctionneraient simultanément, mais sa production doit rester proportionnelle à la consommation.

Bien que la question des stations centrales soit encore récente, les solutions proposées sont déjà nombreuses. Elles se divisent en deux classes distinctes :

1° Les distributions directes, dans lesquelles le consommateur utilise sans intermédiaire l'énergie électrique, telle qu'elle est produite par l'usine ;

2° Les distributions indirectes, où le courant n'est employé qu'après avoir traversé un appareil transformateur qui modifie ses propriétés et lui donne les qualités nécessaires à ses applications.

Nous allons étudier successivement les principaux systèmes applicables dans les deux cas.

DISTRIBUTIONS DIRECTES

308. — Le nombre d'appareils en service pouvant varier constamment, il en est de même de l'énergie électrique à fournir par les dynamos. Or, cette énergie est représentée par le produit de l'intensité par la différence de potentiel aux bornes ; c'est donc ce produit qu'il faut faire varier suivant la demande des appareils récepteurs. On pourrait dans ce but agir sur les deux facteurs à la fois, mais il est évidemment plus simple de le faire sur un seul.

De là deux procédés de distribution ; on peut : 1° laisser la différence de potentiel aux bornes de la machine constante en faisant varier l'intensité ; 2° laisser l'intensité constante en faisant varier la différence de potentiel.

Le premier procédé conduit à placer tous les récepteurs en dérivation sur les deux pôles du générateur dont la différence de potentiel reste constante. Dans le second, au contraire, on dispose les appareils en série sur un même circuit dans lequel l'intensité est constante. Le problème de la distribution revient alors à prévoir un système de régulation qui maintient constante la différence de potentiel ou l'intensité, suivant que l'on emploie la disposition en dérivation ou en série.

Ces deux modes de groupements peuvent être appliqués ; néanmoins le système de la dérivation est, dans la grande majorité des cas, préférable. La régulation y est en effet plus facile ; de plus, la disposition en série rend les appareils dépendants les uns des autres, en sorte qu'un accident en un point du circuit a sur l'ensemble une influence sérieuse. Enfin la distribution à intensité

constante se trouve limitée par la différence de potentiel qui ne peut guère dépasser 2 500 volts, tandis qu'avec la distribution à différence de potentiel constante, l'intensité n'a pour ainsi dire pas de limites. Nous verrons plus tard que cette considération a une certaine importance lorsqu'il s'agit de distribuer en même temps l'éclairage et la force motrice.

309. Distribution à différence de potentiel constante. — Cette distribution a été appliquée pour la première fois dans une station centrale par Edison. La constance de la différence de potentiel aux bornes de la machine s'obtient simplement en faisant varier l'intensité du champ magnétique de la machine génératrice; on augmente le courant inducteur si le travail à produire devient plus considérable, on le diminue dans le cas contraire.

Voici comment Edison a résolu la question dans la distribution de lumière faite par l'usine de Pearl Street, à New-York :

Les électro-aimants inducteurs de la dynamo sont placés en dérivation sur le circuit principal, ainsi qu'un régulateur de résistance sur lequel peut être développée une résistance variable allant jusqu'à 180 000 ohms. L'augmentation ou la diminution de cette résistance se fait à l'aide d'un commutateur circulaire, manœuvré à la main par un ouvrier, qui surveille la valeur du courant au moyen d'appareils galvanométriques. Ces appareils sont placés sur une dérivation prise sur le courant principal; ils renferment un galvanomètre Thomson et une batterie étalon de 110 volts, dont le courant est opposé dans le galvanomètre à celui de la machine. Lorsque l'image réfléchie par le miroir du galvanomètre reste au zéro de l'échelle, c'est que la différence de potentiel entre les conducteurs principaux est exactement de 110 volts; les conditions normales de fonctionnement sont réalisées. Si, au contraire, le galvanomètre subit une déviation, c'est que cette différence de potentiel doit être modifiée, et l'échelle est graduée de façon à indiquer la résistance qu'il faut ajouter ou enlever au circuit inducteur pour remettre les choses dans l'ordre voulu.

Dans la distribution en dérivation, les conducteurs principaux sont parcourus par un courant dont l'intensité est égale à la somme

des intensités des courants qui traversent tous les appareils récepteurs. Il résulte de là que, si le nombre de ces appareils est considérable, l'intensité totale est très élevée, d'où la nécessité d'adopter des conducteurs de gros diamètre. Le système n'est plus alors économique.

Pour remédier à cet inconvénient, on a imaginé d'abord le montage à trois fils, puis celui à cinq fils qui, comme nous l'avons vu § 272, réduisent le poids du cuivre employé.

La grande intensité du courant qui traverse les conducteurs principaux a une autre conséquence, c'est de limiter la longueur de ceux-ci, si l'on ne veut pas que leur résistance absorbe une énergie considérable. Dans la pratique, on ne peut guère dépasser un rayon de 500 à 600 mètres autour de l'usine où sont situées les dynamos. La nouvelle combinaison permet d'augmenter cette distance.

En effet, considérons le cas d'une distribution à cinq fils ; si nous appelons I l'intensité du courant produit par une dynamo et R la résistance d'un des fils principaux (que, pour la facilité du raisonnement, nous supposerons de même longueur), l'énergie absorbée entre les machines et chacun des fils serait, dans le cas de quatre circuits distincts, de $2 R I^2$ pour chaque circuit, soit pour l'ensemble de $8 R I^2$. Avec le montage à cinq fils l'intensité reste la même ; la perte est donc seulement de $5 R I^2$, en admettant encore que les trois fils de compensation aient un diamètre égal à celui des conducteurs principaux, ce qui n'est pas en réalité. Donc, si, dans le premier cas, on admet une distance de 600 mètres, on pourra dans le second prendre 960 mètres, sans que la perte dans les conducteurs ait augmenté.

Des dispositions spéciales ont été prises par Edison pour assurer la régularité du service dans le nouveau système de montage. Chaque centre de distribution renferme un voltmètre et un rhéostat qui permettent de maintenir constante la différence de potentiel entre les deux conducteurs de distribution. Le même résultat s'obtient aussi de l'usine par les régulateurs des champs magnétiques des dynamos et des voltmètres placés dans l'usine et respectivement reliés par des fils fins aux centres de la distribution.

Dans ces conditions, la distribution du courant se fait d'une manière très régulière.

En parlant des différents modes de distribution, nous avons décrit les systèmes à feeders dont le but est de maintenir la différence de potentiel constante dans le réseau. Nous en verrons plus loin quelques applications.

310. Distribution à intensité constante. — Ce système de distribution est surtout appliqué en Amérique avec les régulateurs à arc. M. Bernstein a essayé récemment de l'employer avec des lampes à incandescence de faible résistance et, ainsi que nous l'avons vu dans l'étude des foyers, il a été suivi dans cette voie par MM. Siemens et Edison ; toutefois les lampes de ce genre paraissent jusqu'à nouvel ordre réservées à l'éclairage des voies publiques.

Les appareils récepteurs, se trouvant en série, doivent être mis en court circuit lorsqu'ils ne fonctionnent pas, afin de ne pas interrompre le courant ; nous avons indiqué précédemment les principales dispositions adoptées à cet effet par les différents inventeurs.

Enfin, comme la distribution se fait à intensité constante, la différence de potentiel aux bornes de la dynamo doit varier suivant le nombre d'appareils en service. On obtient ce résultat, soit à la main, au moyen d'un régulateur de champ magnétique que l'on manœuvre en surveillant les indications de l'ampèremètre, soit automatiquement, comme dans la machine Thomson-Houston, par exemple, où l'action est due au décalage des balais.

Le courant ordinairement employé dans les distributions à intensité constante est de 10 ampères ; en raison de cette faible valeur, le circuit peut avoir une longueur beaucoup plus grande que dans le cas de la distribution précédente. La différence de potentiel maxima aux bornes de la dynamo varie entre 2000 et 2,500 volts.

DISTRIBUTIONS INDIRECTES

311. Distribution par accumulateurs. — Le système de distribution le plus sûr au point de vue du fonctionnement est celui qui repose sur l'emploi des accumulateurs ; ceux-ci jouent un rôle

identique à celui des gazomètres des usines à gaz et constituent un réservoir capable de subvenir à tous les besoins du réseau. Le procédé est toutefois peu économique : les frais de premier établissement se trouvent augmentés, et l'exploitation a à supporter les dépenses de renouvellement des plaques et la perte d'énergie due à l'intermédiaire des accumulateurs. Il faudrait que ces appareils fussent perfectionnés sous ces deux rapports, pour recevoir des applications générales dans les stations d'électricité.

Les accumulateurs peuvent être employés de deux manières différentes qui rentrent toutes les deux dans les distributions à différence de potentiel constante :

1° On peut installer les batteries à distance de l'usine et en un certain nombre de points du réseau qui deviennent des centres de distribution. Chacun de ces centres contient deux batteries dont l'une alimente les lampes, tandis que l'autre est chargée par un courant de haute tension envoyé de l'usine. Cette disposition, qui présente toute garantie au point de vue de la sécurité du fonctionnement, a l'inconvénient de doubler le nombre des accumulateurs et d'entraîner à une perte d'énergie assez importante, puisque toute l'énergie consommée par les lampes doit passer par les accumulateurs.

2° Le second procédé, qui a été appliqué à Londres par M. Crompton, à Vienne par M. Monnier et à Berlin par M. de Khotinsky, est plus avantageux que le précédent. Il consiste à établir les lampes et les accumulateurs en dérivation sur la dynamo. De cette manière, les accumulateurs se chargent tant que l'énergie consommée sur le réseau est plus faible que celle fournie par la machine, et celle-ci alimente directement les lampes. Au contraire, lorsque les besoins du réseau augmentent, la dynamo et les accumulateurs ajoutent leurs courants pour desservir les lampes. La figure 196 représente la disposition adoptée à Vienne pour une installation comprenant 4 batteries de 100 volts chacune.

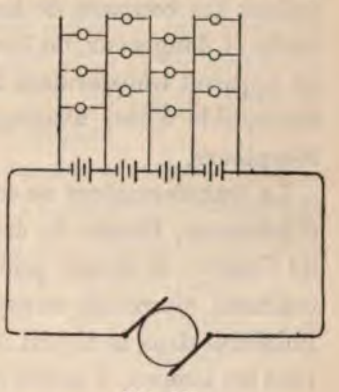


Fig. 196.

Le courant de la dynamo a 400 volts, et la distribution se fait, au moyen du système à 5 fils d'Edison, sur 4 circuits à 100 volts.

Avec ce procédé, le nombre d'accumulateurs est plus faible que dans le cas précédent, et leur rendement n'entre en ligne de compte que pour une faible fraction de l'énergie totale fournie.

312. Distribution par transformateurs secondaires. — Les transformateurs secondaires ont pour but de diminuer la dépense de premier établissement des conducteurs électriques, dépense qui devient considérable lorsque le réseau a une certaine étendue et qui, ainsi que nous l'avons vu précédemment, empêche d'appliquer la distribution Edison ordinaire au delà d'un rayon de 600 mètres.

Les transformateurs reposent sur l'emploi de courants de haute tension. En effet, étant donnée une certaine quantité d'énergie électrique à distribuer sur un réseau, énergie représentée, comme on sait, par EI, on peut modifier la valeur respective de ces deux facteurs, de manière à augmenter E et à diminuer I, sans changer leur produit. On diminue ainsi l'énergie absorbée par la canalisation RI^2, et l'on peut par suite augmenter R, c'est-à-dire réduire le diamètre des conducteurs.

Toutefois, comme on ne peut songer à introduire chez les particuliers des courants de haute tension dont l'emploi serait incommode et dangereux, on établit, à proximité des lampes à alimenter, un appareil transformant le courant à haute tension en un courant susceptible d'être avantageusement employé dans les appareils récepteurs.

Le transformateur se compose en principe d'une sorte de bobine d'induction, formée de deux circuits distincts enroulés l'un autour de l'autre ; le circuit primaire ou inducteur est parcouru par des courants alternatifs envoyés de la station centrale ; ces courants induisent dans le circuit secondaire ou induit, sur lequel sont placées les lampes, d'autres courants alternatifs ; l'intensité et la tension de ces derniers dépendent, pour un courant primaire d'énergie déterminée, des dimensions relatives des deux circuits de la bobine, et peuvent par suite prendre les valeurs que l'on désire.

Le transformateur est donc analogue à une bobine de Ruhm-

korff. Son principe a été indiqué en 1876 par M. Jablochkoff et en 1878 par sir Charles Bright ; mais il n'avait reçu aucune application et personne ne songeait à l'employer avant MM. Gaulard et Gibbs, qui ont construit les premiers appareils en 1883. Depuis cette époque, plusieurs dispositions de transformateurs ont été proposées, dont nous allons étudier les plus importantes.

Transformateurs Gaulard et Gibbs. — Les générateurs secondaires, suivant la dénomination de leurs inventeurs, renferment deux hélices, composées de disques de cuivre superposés et isolés entre eux, de manière que les éléments d'une des hélices se trouvent intercalés entre les éléments de l'autre. Ces disques, d'une épaisseur de $0^{mm},25$, ont la forme d'une couronne circulaire coupée radialement (fig. 197) et sont munis, sur les bords de cette coupure, de deux languettes A B qui servent aux soudures ; ils sont isolés par des disques de papier parcheminé et un vernis qui couvre leurs surfaces. Les uns constituent le circuit primaire ; les autres forment le circuit secondaire. Les jonctions de disque à disque se font au moyen des languettes A B, la languette B du premier disque du circuit primaire, par exemple, étant soudée à A du second, puis B du second à A du troisième, et ainsi de suite. On a donc en réalité une spirale en ruban de cuivre ayant autant de spires qu'il y a de disques.

Fig. 197.

Dans ces conditions, le passage des courants alternatifs dans la série des disques primaires engendre dans l'autre série des courants induits, qui sont d'ailleurs renforcés par un noyau de fer doux qu'on introduit dans l'axe de la bobine. Les courants induits sont recueillis en tension ou en quantité, les divers éléments de la spire secondaire pouvant eux-mêmes être combinés en tension ou en quantité.

Dans les premiers modèles de transformateurs Gaulard, le noyau de fer pouvait pénétrer plus ou moins à l'intérieur des bobines, de manière à modifier l'action mutuelle des circuits. Le noyau des appareils actuels (fig. 198) est fixe et fermé sur lui-même, c'est-à-

dire qu'il a la forme d'un anneau dont chaque tige verticale supporte une bobine; suivant l'inventeur, cette disposition favorise les effets d'induction.

La transformation du courant opérée dans l'appareil entraîne

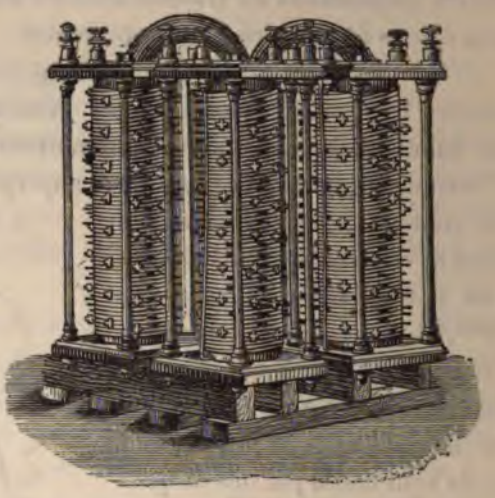


Fig. 198.

naturellement une perte d'énergie; mais cette perte est minime. D'après des expériences exécutées en 1884 à Turin par le professeur Ferraris, le rendement du transformateur atteint 92 p. 100. Dans la pratique, on peut compter au moins sur 85 p. 100.

Transformateur Zipernowsky, Déri et Blathy. — Le transformateur de MM. Zipernowsky, Déri et Blathy, ingénieurs de la maison Ganz, de Budapest (fig. 199), est un anneau Gramme dont les bobines sont isolées les unes des autres. Les bobines de rang pair sont reliées entre elles et forment le circuit primaire; le circuit secondaire est composé des bobines de rang impair; le noyau est un faisceau de fils de fer doux.

Le rendement de l'appareil varie de 85 à 90 p. 100; suivant M. Ferraris, la disposition annulaire adoptée par les inventeurs hongrois serait préférable à l'emploi des rondelles superposées indiquées par M. Gaulard.

Transformateur Swinburne. — M. Swinburne, ayant observé

qu'en service journalier la perte d'énergie dans le fer des transformateurs ordinaires était pendant vingt-quatre heures bien supérieure à celle qui a lieu dans le cuivre pendant les deux heures de service moyen de l'appareil, a cherché à supprimer cet inconvénient en diminuant la masse de fer. Il est donc revenu aux

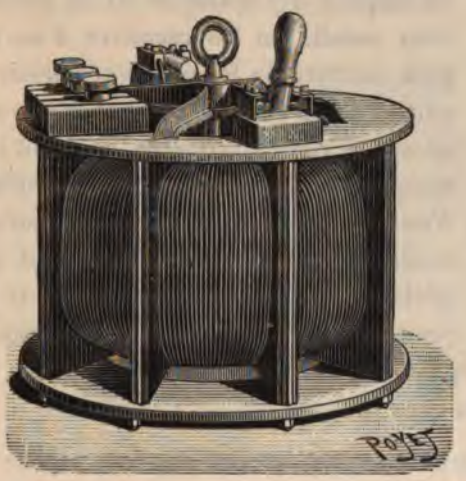


Fig. 199.

transformateurs à circuit magnétique ouvert, comme ceux que Gaulard avait créés au début, où la longueur du fer est environ le tiers de celle des transformateurs à circuit fermé. Mais un transformateur à circuit ouvert présente une plus grande résistance magnétique; on est donc obligé d'augmenter l'excitation, ce qui conduit à une plus grande perte d'énergie dans le cuivre.

M. Swinburne a adopté un moyen terme en donnant aux extrémités de son appareil une forme de hérisson. Par cet épanouissement, on augmente la section d'air par laquelle les lignes de force se ferment et on obtient une résistance relativement peu élevée. Et si la perte en watts à pleine charge est un peu plus grande pour ce transformateur que pour ceux à circuits magnétiques fermés, elle l'est beaucoup moins à très faible charge, de sorte que finalement, au bout de vingt-quatre heures, la dépense totale d'énergie paraît être bien moindre.

L'appareil comprend une carcasse composée de deux lames de

bronze perpendiculaires l'une à l'autre et venues de fonte, munies d'oreilles laissant passer quatre tiges de même métal servant à à maintenir, au moyen de boulons, un disque circulaire de bois, comme l'indique la figure 200. Dans les quatre dièdres formés par cette carcasse, on dispose des bottes de fil de fer très fin et très bien recuit. On les recouvre d'un ruban isolant, puis on enroule le circuit secondaire et on le recouvre d'une feuille d'ébonite. Enfin on bobine pardessus le circuit primaire, en ayant soin d'enrouler chaque moitié de ce circuit à droite et à gauche d'une cloison d'ébonite que l'on met au milieu pour avoir les deux extrémités du circuit à la partie supérieure de l'enroulement et aussi éloignées que possible l'une de l'autre. Les extrémités du noyau sont ensuite épanouies et taillées en demi-sphères, et le transformateur est mis dans un vase en terre vernie.

Fig. 200.

Transformateur Ferranti. — Cet appareil repose sur le même principe que les précédents; les bobines primaires et secondaires sont enroulées sur un cadre rectangulaire enveloppé par le circuit magnétique, et divisé en quatre parties dont chacune est formée par des bandes de tôle mince isolées les unes des autres et repliées. L'ensemble est maintenu par une enveloppe de fonte.

Transformateur Westinghouse. — Les transformateurs de la

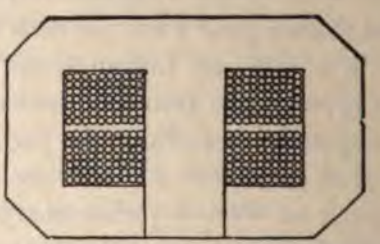


Fig. 201.

Compagnie américaine Westinghouse, propriétaire des brevets Gaulard et Gibbs pour les Etats-Unis, ont été combinés par MM. Schmidt et Stanley, ingénieurs de cette compagnie.

Les bobines primaire et secondaire sont placées côte à côte (fig. 201) à l'intérieur d'une carcasse en fer doux, qui sert à concentrer les lignes de force ; cette carcasse est formée de minces tôles isolées les unes des autres au moyen de papiers vernis et maintenues par deux plaques de fonte et quatre boulons. L'aspect extérieur de l'appareil est représenté figure 202.

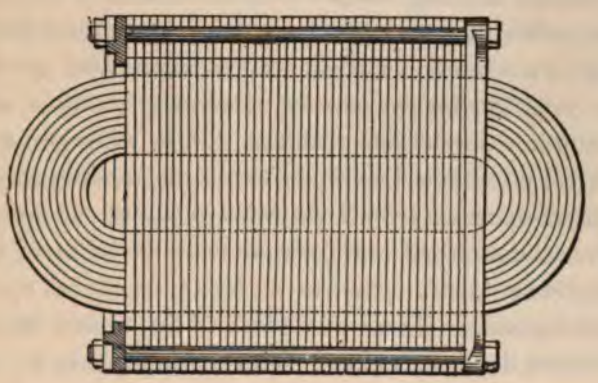


Fig. 202.

Le transformateur est renfermé dans une boîte en fonte. Les deux circuits aboutissent à des bornes placées dans des chambres séparées auxquelles des regards donnent accès.

313. Montage des transformateurs. — Comme dans le cas de la distribution directe, l'emploi des transformateurs conduit à deux systèmes principaux de distribution, suivant que sur le circuit secondaire la différence de potentiel aux bornes du transformateur ou l'intensité reste constante. Ces deux éléments du circuit secondaire variant proportionnellement aux deux éléments correspondants du circuit primaire, il suffira que la différence de potentiel aux bornes du circuit primaire du transformateur et par suite de la dynamo, ou l'intensité reste constante.

Avec une différence de potentiel aux bornes de la dynamo constante, les transformateurs seront en dérivation sur le circuit primaire. Au contraire, ils se trouveront en tension lorsque l'intensité restera constante. Les qualités et les défauts des deux systèmes sont les mêmes que ceux que nous avons indiqués pour

les distributions directes, mais nous devons ajouter que le montage en série n'a encore reçu aucune application.

Il existe une troisième solution, qui a été souvent employée surtout au début par MM. Gaulard et Gibbs ; elle consiste à placer les transformateurs en tension sur le circuit primaire et les lampes en dérivation sur les circuits secondaires, mais elle donne des résultats moins avantageux que les précédentes.

Les dispositifs, adoptés dans le cas des distributions directes pour maintenir la constance de la différence de potentiel ou de l'intensité, sont tous applicables sur les machines dynamos alimentant une distribution par transformateurs. Citons néanmoins l'appareil installé à cet effet dans l'usine de Tours qui modifie automatiquement la résistance du circuit du courant excitateur de la dynamo alternative. Il comprend une sorte de fléau de balance, aux extrémités duquel sont deux cylindres en fer. L'un de ces cylindres est placé dans l'intérieur d'un solénoïde à fil fin, monté en dérivation sur les bornes de l'alternative ; l'autre plonge dans un vase rempli de mercure. Si la tension du courant de l'alternative dépasse sa valeur normale, l'attraction du solénoïde sur le premier cylindre prédomine sur le poids du second. Celui-ci s'élève, le niveau du mercure s'abaisse et, dans son mouvement, augmente la résistance du circuit excitateur de l'excitatrice. L'action se produit en sens opposé dans le cas contraire. On arrive ainsi à obtenir aux bornes de l'alternative une différence de potentiel parfaitement constante.

314. Précautions. — Pour empêcher tout accident, il est important de bien choisir l'emplacement des transformateurs. Quelquefois on les dispose sur certains points centraux d'une ville où l'on fait aboutir les fils des différents réseaux voisins ; dans d'autres cas, on met un transformateur dans chaque maison qu'on éclaire. Tout dépend des circonstances locales.

Quel que soit le mode adopté, l'appareil doit être bien protégé, et il est prudent de l'enfermer dans une boîte spéciale. Des coupe-circuits sont installés sur chaque conducteur primaire alimentant le transformateur ; il en est de même pour les conducteurs secondaires.

Dans un tranformateur, il peut se produire des fuites dues à un

défaut d'isolement. Une fuite de cette nature, même très faible, existant entre les bobines primaire et secondaire, il peut arriver qu'un courant à haute tension s'introduise dans le circuit secondaire et donne lieu à des accidents. On évite cet inconvénient au moyen d'un dispositif mettant automatiquement le transformateur hors du circuit primaire aussitôt que la différence de potentiel entre le circuit secondaire et le sol atteint une limite déterminée.

L'appareil Cardew, imaginé à cet effet, se compose d'une boîte métallique en communication avec le sol ; sur le fond de la boîte repose une feuille d'aluminium très mince, à 3 millimètres environ au-dessous d'un disque métallique monté sur une tige qui communique avec le circuit secondaire par l'intermédiaire d'un fil fin fusible. Ce fil maintient la clef d'un interrupteur à ressort dont les bornes sont reliées à celles du circuit primaire. Lorsque la différence de potentiel entre la terre et le circuit secondaire atteint la limite fixée, la feuille d'aluminium, attirée par le disque métallique, détermine le passage d'un courant qui fond le fil ; la clef de l'interrupteur étant abandonnée à l'action du ressort, les deux bornes du circuit primaire sont mises en court circuit et l'appareil se trouve isolé par suite de la fusion immédiate des coupe-circuits de la ligne primaire.

EXEMPLES D'INSTALLATIONS

315. Station des Halles à Paris. — Le programme à remplir était d'abord d'éclairer les Halles et leurs sous-sols, ensuite de distribuer l'électricité aux particuliers.

Le crédit alloué était d'un million. Sur ce chiffre, 500 000 francs ont été destinés à l'usine proprement dite, et 500 000 francs à la distribution du courant et aux appareils d'éclairage. En comptant sur la moyenne généralement adoptée de 600 francs par cheval nominal pour les moteurs et les dynamos, on voit que l'usine pouvait comporter 800 à 900 chevaux. On s'est décidé à diviser cette puissance totale en six groupes de 140 chevaux chacun. Quatre de ces groupes sont destinés au service courant, les deux autres constituent une réserve en cas d'accident.

L'installation du gaz comprenait auparavant, dans les sous-sols, 512 becs ; l'éclairage des pavillons et des voies qui les traversent comportait 837 becs et 76 foyers intensifs.

Les 512 becs de gaz des sous-sols ont été remplacés par 600 lampes à incandescence de 16 bougies; dans les pavillons on a installé 184 régulateurs à arc. Ces divers foyers représentent une force de 195 chevaux. Ce chiffre est un peu exagéré, eu égard aux intentions exprimées par le Conseil municipal ; mais l'observation suivante a permis de le réduire.

Jusqu'à 8 heures du soir, heure à laquelle on ferme les pavillons, l'éclairage n'a que les trois cinquièmes de sa valeur totale; de 8 heures du soir à 2 heures du matin, il n'atteint que un cinquième. Depuis 2 heures du matin l'éclairage est complet. Ainsi, s'il faut 195 chevaux pour l'éclairage total, 140 suffisent jusqu'à 2 heures du matin. On s'est donc déterminé à employer 140 chevaux d'une façon permanente et à emprunter le surplus aux machines destinées au service privé. Comme on le voit, il reste pour les abonnés trois machines dont chacune représente 1 500 lampes, soit en tout 4 500 lampes.

L'usine est placée dans les sous-sols des Halles centrales. Elle dispose d'une superficie de 1 260 m^2 pour la salle des machines, et de 300 m^2 pour la chambre de chauffe.

Chaudières. — Les chaudières, du système Belleville, sont au nombre de 6 ; elles peuvent fournir 1 500 kilogrammes de vapeur par heure à la pression de 12 kilogrammes par centimètre carré.

Moteurs. — Les moteurs à vapeur comportent :

1° Trois machines à vapeur Weyher et Richemond, verticales, à triple expansion, produisant chacune 140 chevaux à la vitesse de 160 tours.

2° Trois machines Lecouteux et Garnier, type Corliss, à un seul cylindre, horizontales, à quatre distributions et à condensation. Chacune de ces machines fournit 140 chevaux au septième d'admission et à 7 kilogrammes de pression ; elle peut donner 255 chevaux à un quart d'admission.

Dynamos. — Les dynamos sont les unes à courant continu, les autres à courants alternatifs.

Les premières, au nombre de 6, du type Edison de 50 000 watts (450 ampères et 110 volts), sont commandées par les moteurs Weyher et Richemond. Elles sont excitées en dérivation et munies d'un rhéostat permettant de faire varier à volonté al résistance du circuit excitateur et par suite son intensité, afin de régler la force électromotrice de la machine. Le rendement industriel de ces dynamos varie de 91 à 93 p. 100 en pleine charge.

Les dynamos alternatives, du système Ferranti, sont respectivement commandées par un des moteurs Lecouteux et Garnier. Elles peuvent fournir chacune 2 400 volts et 46,5 ampères, soit 112 000 watts. Chaque machine est excitée par une petite dynamo Thury à courant continu, montée sur le même arbre.

Distribution à courant continu. — Pour la distributien à courant continu, on emploie le système Edison à trois fils dont nous avons parlé précédemment, avec cette différence que l'on peut associer en quantité jusqu'à 3 machines entre le fil de compensation et chacun des deux autres conducteurs.

Chaque dynamo peut être introduite dans le circuit ou en être retirée pendant que les autres machines sont en service. Cette opération se fait au moyen d'un appareil nommé *inverseur* composé d'une manette mobile autour de son axe, dont les deux extrémités communiquent avec les pôles de la dynamo. Suivant la position de cette manette, la dynamo se trouve intercalée entre le fil de compensation et l'un des deux autres conducteurs.

Les six inverseurs sont placés sur un même bâti à la partie inférieure duquel sont disposés les six rhéostats des circuits excitateurs. Ces rhéostats sont introduits dans les circuits au moyen de volants montés sur un même arbre, sur lesquels ils peuvent être, soit fous, soit embrayés. De cette manière on peut : ou manœuvrer isolément le rhéostat de chaque machine, ce qui est nécessaire pour introduire une dynamo dans le circuit où travaillent déjà d'autres machines, et amener sa tension à la valeur que possède celui-ci; ou agir à la fois sur tous les rhéostats quand

toutes les dynamos travaillent ensemble et doivent être réglées simultanément suivant les exigences de la consommation.

Les variations du courant sont indiquées à l'usine au moyen de lampes-témoins et de sonneries actionnées par des fils spéciaux branchés en certains points du réseau. Le réglage se fait à la main d'après ces indications. Dans ce but, les conducteurs, en sortant du tableau de distribution, arrivent à un *tableau de réglage* où sont disposés des rhéostats de compensation qu'on manœuvre suivant les besoins et qui permettent de maintenir constante la différence de potentiel aux extrémités des feeders, quel que soit le nombre des lampes allumées. Sur les trois fils constituant le circuit extérieur, les deux extrêmes seuls sont munis de rhéostats, le fil de compensation n'en a pas.

7 feeders partent du tableau ; 2 desservent les Halles elles-mêmes et les 5 autres distribuent la lumière au quartier environnant; ils comprennent chacun trois câbles.

Les deux feeders des Halles aboutissent en deux centres de distribution où se ramifient d'autres câbles allant aux pavillons. Les lampes à incandescence, au nombre de 600, sont placées en dérivation entre le fil de compensation et l'un des deux autres câbles ; elles absorbent de 100 à 110 volts et sont disposées sur deux circuits indépendants pour qu'on puisse en éteindre à volonté un certain nombre. 184 régulateurs à arc de différents systèmes, mais tous de 50 volts, sont montés par quatre en série entre les deux câbles extrêmes de chaque feeder.

Les 5 derniers feeders desservent les rues du Pont-Neuf, Berger, Rivoli et des Halles. La chute de potentiel consentie est de 15 volts à leur extrémité, la lampe la plus éloignée est à 900 mètres de l'usine. Le nombre de lampes prévues est de 2000 de 60 watts.

Dans l'intérieur des Halles, le système de canalisation consiste en moulures en bois goudronné dans lesquelles sont placés les câbles, soutenus par des isolateurs en porcelaine. La canalisation extérieure est décrite dans un chapitre suivant consacré aux canalisations souterraines.

Distribution à courants alternatifs. — Ce mode de distribution

diffère de celui à courant constant. En effet les machines Ferranti se prêtent mal à l'assemblage en quantité ; on doit donc alimenter par chaque dynamo un réseau, en se réservant la facilité de réunir plusieurs réseaux sur une même machine tant que sa puissance peut y suffire. Le système de distribution comprend donc un tableau où aboutissent les conducteurs des dynamos ainsi que les circuits, et des commutateurs permettent de les relier ensemble suivant les besoins.

Les courants qui ont une tension de 2 400 volts traversent des transformateurs, du type Ferranti, placés chez les abonnés, et sont livrés à la tension de 60 ou 100 volts. Ces appareils sont disposés dans des armoires spéciales dont le service municipal a seul la clef. A la « Belle Jardinière », il existe 11 transformateurs : 6 de 15 kilowatts et 5 de 7, 5 kilowatts. Ce magasin est éclairé par 100 régulateurs à arc Pieper et par 1 270 lampes à incandescence.

Sur les conducteurs à courants alternatifs on a disposé des coupe-circuits du système Ferranti. Cet appareil est formé d'une boîte longue en poterie, dans laquelle est une rainure terminée par deux échancrures, au fond desquelles arrivent les deux bouts du conducteur. Dans ces échancrures on dispose des tiges métalliques reliées par des fils en platinoïde ; ces fils constituent la portion fusible, et leur nombre est calculé d'après l'intensité limite.

Exploitation. — L'usine, déduction faite du tiers de la puissance constituant la réserve, dispose aux bornes des machines de 198 000 watts en courant continu, et de 224 000 en courants alternatifs. En admettant une perte de 10 p. 100, il y a 380 000 watts disponibles. Les Halles consomment 94 000 watts ; il en reste donc 286 000 pour les abonnés.

La dépense totale a été 1 130 000 francs comprenant :

Chaudières et accessoires	78 000 francs.
Machines à vapeur	180 000 —
Dynamos	136 000 —
Tableaux et appareils de distribution	12 000 —
A reporter. . .	406 000 francs

Report	406 000	francs
Canalisation des Halles	55 000	—
Canalisation extérieure. — Basse tension	135 000	—
— — Haute tension.	160 000	—
Appareillage de l'usine, lampes, suspensions, etc. .	105 000	—
Maçonnerie, serrurerie, fumisterie	147 000	—
Bureaux, forges, magasins	18 000	—
Canalisation d'eau	20 000	—
Laboratoire.	7 000	—
Transformateurs	31 000	—
Travaux en régie	46 000	—
	1 130 000	francs.

L'usine comportant une force de 960 chevaux, le cheval nominal pour la partie mécanique et électrique revient au prix de $\frac{78\,000 + 180\,000 + 136\,000}{960}$, soit 400 francs.

L'usine est dirigée par un conducteur ; le personnel comprend deux équipes, l'une pour le jour, l'autre pour la nuit. Chacune comporte : 1 piqueur, 1 chef ouvrier, 3 chauffeurs, 1 roulier de charbon, 4 électriciens, 4 mécaniciens. Il existe en plus, hors de l'usine, 6 hommes chargés de changer les charbons des lampes et de surveiller l'éclairage des Halles.

Abonnements. — L'énergie électrique est fournie au compteur. Tout abonnement doit comporter au moins une durée d'un an.

La ville conduit le courant devant la demeure de l'abonné ; le branchement et l'installation intérieure sont aux frais de celui-ci, mais doivent être reçus par la Ville.

Le courant est livré à la tension moyenne de 100 volts. Le prix payé ne peut être inférieur, dans un an, à 40 francs par lampe de 10 bougies, ni à 400 francs par régulateur à arc.

Le prix est de 0 fr. 15 les 100 watts-heure. Tout abonné dont les lampes ont brûlé en moyenne 150 à 180 heures par mois a droit à une réduction de 10 p. 100 sur la quittance mensuelle ; de 180 à 200 heures la réduction est de 20 p. 100 ; au-dessus de 200 heures elle est de 30 p. 100.

316. Station de l'avenue Trudaine à Paris. — Cette station vient d'être installée par la Cie Edison ; la canalisation est à trois fils, et avec feeders. Les dynamos à 8 pôles sont à induit double et à

double collecteur ; elles donnent 200 000 watts (125 volts et 1 600 ampères) à la vitesse de 125 tours. Deux induits avec leurs collecteurs sont montés sur un même arbre et tournent à l'intérieur de deux inducteurs formés de huit pôles disposés en cercle. On a en réalité deux machines distinctes au point de vue électrique, mais montées sur le même bâti et commandées par le même arbre. Cette disposition est motivée par le système de distribution à trois fils qui exige deux dynamos accouplées en série, comme nous l'avons vu précédemment.

L'arbre est attelé directement au moteur à vapeur par l'intermédiaire de plateaux à bielles.

Intensité normale, 800 × 2 =	1 600 ampères.
Intensité maxima, 1 000 × 2 =	2 000 —
Vitesse	135 tours par minute.
Résistance d'un circuit inducteur	4,80 ohms.
Résistance — induit,	0,0037 —
Poids d'un inducteur double,	8 250 kil.
— induit double.	15 350 —
Poids total	23 000 —
Diamètre de l'anneau	1^m,80.

Il n'existe pas de tableau général de distribution ; chaque organe, machine ou feeder, a un appareil spécial. La figure 203 montre schématiquement la disposition adoptée.

M M représente une machine à double induit ; les deux conducteurs extrêmes sont figurés en F, F, le conducteur de compensation en F'. Deux interrupteurs conjugués I, I à verrou sont placés sur les conducteurs F, F ; en manœuvrant le levier on ferme ou l'on ouvre le circuit à la fois sur les deux conducteurs. Les inducteurs étant en S, S, deux interrupteurs de champ magnétique également conjugués sont disposés en K, K ; A, A sont les ampèremètres ; V, V les voltmètres.

Les régulateurs de champ sont figurés en R, R. Ils sont disposés de telle façon que l'on peut manœuvrer isolément le régulateur de chaque machine, ou les rendre tous solidaires l'un de l'autre.

Théoriquement la disposition est analogue à celle que nous avons décrite pour la station centrale des Halles, mais elle

diffère un peu dans les détails; la figure 204 montre l'installation telle qu'elle est faite pour une machine. Le curseur *C* peut être commandé directement par la manivelle *x*, et dans ce cas il se meut

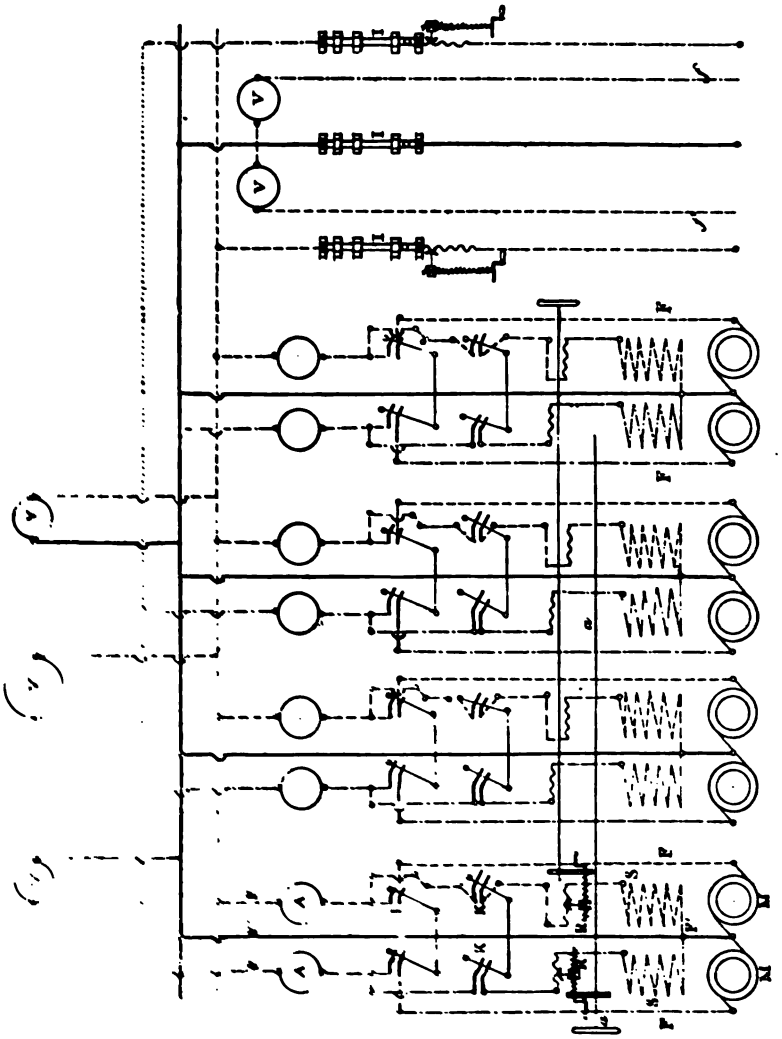


Fig. 203.

isolément. Son arbre peut être également manœuvré par une roue dentée à calage mobile qui la fait à volonté engrener avec un pignon porté par l'arbre *y*, regnant tout le long du bâti, et peut commander les régulateurs de toutes les machines par un dispositif analogue, on obtient ainsi un mouvement solidaire de tous les

curseurs et un réglage uniforme. Les résistances sont représentées en R.

L (fig. 204) est un interrupteur à verrou pour la ligne; *l* est l'interrupteur de champ magnétique. Ces appareils sont disposés de telle sorte que l'on ne peut abaisser le levier L que quand *l* est lui-même en bas; c'est-à-dire qu'on ne peut fermer le circuit de ligne que quand le circuit inducteur a été préalablement fermé.

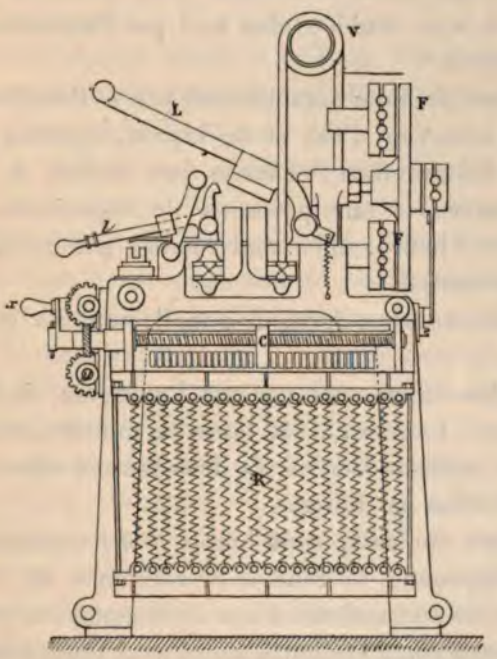


Fig. 204.

Dans ce but, le levier L, qui a, en plan, la forme d'un fer à cheval allongé, est muni en son milieu d'une traverse qui vient buter sur *l* et empêche le mouvement tant que ce dernier est en haut. De même, pour relever *l*, il faut que L ait été lui-même relevé, c'est-à-dire qu'il faut ouvrir le circuit de ligne avant d'ouvrir celui de champ.

La partie droite de la figure 203 montre la disposition adoptée pour le réglage des feeders; un seul groupe y est indiqué; il en existe dix semblables. I, I sont des interrupteurs à verrou, R, R les

rhéostats des feeders, V, V des voltmètres reliés par les fils *f*, *f* aux embranchements des abonnés.

317. Station du secteur de la place Clichy à Paris. — Cette station est aménagée de façon à pouvoir assurer le service de 45 000 lampes à incandescence de 10 bougies en utilisant une force motrice de 3 000 chevaux. En ce moment, on n'a installé encore que la machinerie nécessaire pour produire la moitié de cette force qui sera doublée plus tard par l'adjonction de nouvelles chaudières.

La vapeur est produite actuellement par 6 chaudières multitubulaires avec réservoir d'eau et de vapeur, système de Naeyer, timbrées à 8 kilogrammes; chacune une surface de chauffe de 245 mètres carrés et une puissance de vaporisation de 2 500 kilogrammes à l'heure; elles sont réunies par groupes de deux dans un même massif.

Les machines motrices forment actuellement six groupes comprenant :

Trois machines Compound système Armington, de 150 chevaux effectifs chacune, tournant à 240 tours par minute; trois machines à un cylindre, système Corliss, de 500 chevaux effectifs chacune, tournant à 64 tours par minute.

Les machines motrices sont toutes à échappement libre; la vapeur d'échappement se rend à la cheminée de l'usine après avoir traversé les réchauffeurs d'eau d'alimentation. On n'emploie pas de machines à condensation, d'abord pour supprimer la dépense d'eau qui est fort chère à la cote où se trouve l'usine, ensuite pour simplifier le matériel et éviter ainsi les accidents qui sont susceptibles d'immobiliser les moteurs.

Les dynamos constituent six groupes commandés respectivement par un des moteurs. Les trois premiers, actionnés par courroie par les machines Armington, se composent chacun de deux dynamos à courant continu, dont l'ensemble peut débiter pour chaque groupe 200 ampères, sous une tension variable de 450 à 500 volts, à la vitesse de 380 tours.

Les trois autres groupes comprennent chacun une dynamo à courant continu pouvant débiter 700 ampères sous une tension

également variable de 450 à 500 volts; ce dernier type de dynamo, très remarquable par ses dimensions, est actionné directement par la machine motrice, l'induit étant fixé sur l'arbre moteur lui-même; sa vitesse est donc, comme pour celui-ci, de 64 tours par minute. Il est multipolaire et comporte huit pôles; l'induit est un anneau Gramme de $3^m,300$ de diamètre extérieur et $0^m,500$ de largeur, dont l'enroulement dénudé extérieurement sert de collecteur; huit séries de balais viennent frotter à sa surface pour recueillir le courant.

Le poids de chaque induit, y compris l'étoile en fonte qui le supporte, atteint 10 000 kilogrammes. Le rendement industriel de ces dynamos est voisin de 92 pour 100.

Comme on le voit, on a adopté dans l'usine deux types de machines de puissance différente; ce choix a pour but de permettre l'arrêt des grandes machines de 500 chevaux aux heures de la journée où la consommation du réseau ne nécessite pas une force motrice supérieure à 150 chevaux; on marche alors d'une façon plus économique avec les machines Armington.

Les six groupes de dynamos envoient leur courant dans les conducteurs du tableau de distribution.

Celui-ci présente l'aspect d'un vaste panneau rectangulaire à deux étages avec charpente en fer; l'étage inférieur pourvu de rhéostats, d'interrupteurs, d'ampèremètres, de voltmètres, etc., est destiné au réglage des dynamos; l'étage supérieur, muni d'appareils analogues, sert à répartir le courant dans les feeders qui viennent aboutir à la face postérieure du tableau.

Du tableau, les feeders gagnent le sous-sol de l'usine par un plan incliné en bois sur lequel ils sont simplement posés, et en sortent par un tunnel placé sous la rue des Dames, pour s'engager sous les trottoirs.

Le système de distribution est à *cinq fils;* la description en a été donnée, page 353; il permet de distribuer le courant à une grande distance, qui dans le cas actuel atteindra 2 500 mètres, sans qu'il existe entre les premières et les dernières lampes du réseau une différence de potentiel trop considérable.

Les feeders viennent se brancher sur les câbles extrêmes de ces cinq fils en différents points du réseau choisis avec soin; chaque

feeder porte avec lui un fil de contrôle isolé qui aboutit dans l'usine à un des voltmètres du tableau de distribution ; on a ainsi la possibilité de connaître à chaque instant la différence de potentiel entre les extrémités de chaque couple de feeders et, par suite, de la maintenir constante et égale à 440 volts au moyen d'appareils de réglage.

Pour maintenir toujours égale cette répartition de 440 volts entre les cinq câbles, et cela quel que soit le nombre des foyers alimentés par chacun des quatre ponts qu'ils constituent, on emploie des égalisateurs installés en différents points du réseau, réglant automatiquement la répartition de la tension. Six petites stations occupant un local extrêmement restreint et contenant ces appareils d'équilibre sont actuellement en service. Ces appareils ont été décrits § 272.

Les feeders installés pour l'alimentation du réseau sont actuellement au nombre de 12 ; ils sont calculés pour une perte de charge maxima de 14 p. 100.

Les câbles sont du système Siemens, sous plomb, avec armature en acier. Leur gaine métallique permet de les placer directement en terre sous les trottoirs. Les raccordements se font par des manchons spéciaux et des boîtes de distribution.

Dans les sous-sol de l'usine sont en outre installées deux batteries d'accumulateurs du type Laurent Cély comprenant chacune 250 éléments à 250 kilogrammes de plaques. Ces batteries, chargées pendant le jour par les dynamos, sont destinées à assurer le service depuis minuit jusqu'à 8 ou 9 heures du matin, les machines ne travaillant pas pendant cette période.

Le matériel, chaudières, dynamos, machines à vapeur, câbles, à été fourni par la Société alsacienne de construction mécanique de Belfort.

CANALISATIONS ÉLECTRIQUES

Les lignes électriques peuvent être aériennes ou souterraines.

318. Canalisations aériennes. — Pour les canalisations aériennes on emploie des fils de cuivre nus ; ils ont de $0^{mm},04$ à 5 milli-

mètres de diamètre. Quand on a besoin de sections plus grandes, on emploie des torsades de fil ; de cette façon, un accident arrivé à un fil ne compromet pas le reste du conducteur. Quand la section dépasse 150 à 200 millimètres carrés, il vaut mieux employer plusieurs conducteurs.

Les poteaux destinés à supporter ces lignes sont en bois de pin ou de sapin injecté de sulfate de cuivre ou de créosote.

Quand l'effort exercé sur un poteau est trop considérable, par exemple dans les courbes, on le maintient par une contrefiche, ou bien on le forme de 2 poteaux réunis par des brides en fer.

On se sert aussi de poteaux en fer. Ils sont formés quelquefois d'un simple fer à T, ou de deux bandes hémi-cylindriques réunies ensemble.

Entre les supports et les fils on interpose des isolateurs en porcelaine. Les formes sont très variables ; nous ne les décrirons pas ici. Notons seulement qu'ils doivent se nettoyer facilement ; car la poussière qui s'accumulerait à leur surface finirait par établir une communication entre le conducteur et le support. L'humidité peut produire le même effet.

Quand il s'agit de transmettre des courants à très haute tension, comme nous le verrons en parlant des expériences de M. Brown sur la transmission électrique de la force à grande distance et sur les courants alternatifs, on emploie des isolateurs d'un modèle particulier imaginés par MM. Johnson et Philipps de Londres. Ces appareils sont en porcelaine, et le rebord inférieur forme une rigole annulaire dans laquelle on met de l'huile, qui est un isolant parfait. L'huile sépare la surface intérieure de la surface extérieure et empêche toutes les communications avec la terre qui pourraient être créées soit par l'humidité, soit par les poussières.

Le pouvoir isolant de ces appareils est très élevé. M. Weber, de Zurich, a fait, en 1887, des expériences sur la ligne Soleure-Kriegstetten, construite un an et demi auparavant avec ces isolateurs et à laquelle on n'avait jamais touché depuis. Il n'a pas constaté la moindre perte avec un courant de 2 000 volts.

Pour poser les conducteurs le long des murs, on peut dans des endroits parfaitement secs se contenter de crochets émaillés

enfoncés dans le mur ; mais il est toujours bon d'interposer un bout de tube en caoutchouc.

Dans les cas ordinaires, on se sert de boutons en porcelaine à gorge scellés au mur. Pour supporter plusieurs câbles parallèles, par exemple, dans les stations centrales, on les maintient entre deux semelles en bois assemblées à boulons, et les câbles passent dans des manchons en porcelaine.

319. Canalisations souterraines. — Cette question est très importante, car ce mode de canalisation est le seul qui soit possible à Paris et dans la plupart des grandes villes. Malheureusement elle est encore loin d'être élucidée ; l'expérience seule peut en effet décider parmi les systèmes proposés, et ceux-ci sont tous trop récents pour que les essais aient déjà pu fournir des résultats concluants.

Le programme à remplir offre d'ailleurs de graves difficultés. Il faut que les câbles soient protégés contre les chocs et les tassements, qu'on puisse y faire facilement les visites et les travaux de réparations, de raccord et de branchement. On doit aussi, dans une installation de ce genre, prévoir les accroissements futurs du réseau.

En outre, les dépenses exigées par ces canalisations étant considérables, on doit chercher à les réduire autant que possible, tout en faisant le nécessaire pour éviter les réparations qui sont toujours très difficiles dans les rues.

Deux systèmes sont employés :

1° Le conducteur est enfermé dans une enveloppe qui sert à le garantir ; on emploie dans ce but des tuyaux et des caniveaux en poterie, en fonte ou en fer. Dans certains cas, les câbles sont recouverts d'une enveloppe isolante ; d'autres fois ils sont nus et portés par des isolateurs ; enfin ils sont quelquefois noyés dans une composition bitumineuse qu'on verse dans le caniveau.

2° Dans le second système, le conducteur de cuivre, parfaitement isolé, est protégé par une armature de plomb, de fer ou d'acier, et placé directement dans le sol sans aucune protection.

Nous allons décrire quelques-uns des procédés employés.

Systèmes de la Compagnie Popp. — Deux systèmes sont en usage dans la Compagnie Popp, suivant qu'on a affaire à des câbles isolés ou à des câbles nus.

1° Pour les câbles isolés, le caniveau protecteur est formé de pièces en fonte en forme d'U recouvertes d'un couvercle plat ou arrondi, d'un mètre de longueur et raccordées par emboîtement. Les dimensions de cette conduite varient avec le nombre de câbles qu'elle doit contenir et qui sont souvent rangés sur plusieurs étages. Les câbles sont supportés par des moulures en bois

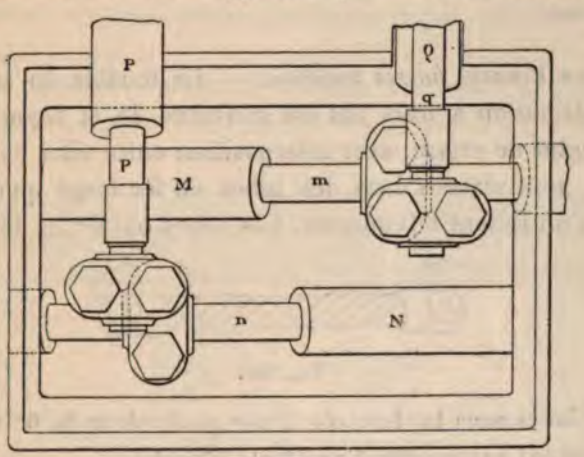


Fig. 205.

imprégné de paraffine qui divisent les canaux en un certain nombre de cases séparées. La paraffine a pour but d'empêcher le bois de pourrir.

A la traversée des rues, sont percés des puits qui se raccordent entre eux sous la chaussée par une galerie horizontale et qui sont bouchés à la partie supérieure par des tampons de fonte. Les câbles sortant des caniveaux de fonte sont supportés sur les parois du puits par des pinces en bois paraffiné scellées dans la maçonnerie.

2° Les câbles nus sont placés également dans des caniveaux en fonte. Le fond est garni d'une planche de sapin paraffiné sur laquelle on boulonne, à intervalles de 0,90 à 1^m,80, des tasseaux de chêne. Ceux-ci sont formés de deux parties comprenant entre elles des isolateurs en porcelaine qui supportent les câbles.

Aux points où les conducteurs des abonnés viennent s'embrancher sur les câbles sont disposées des boîtes en fonte nommées *boîtes d'abonnés* (fig. 205). Le raccord se fait au moyen d'une pièce en cuivre présentant deux colliers à vis entre lesquels on pince les bouts des conducteurs M, N et des branchements P, Q, qu'il s'agit de relier entre eux. Les conducteurs sont dénudés sur une petite longueur; on les serre dans les brides du raccord, puis on coule une substance isolante dans la boîte de fonte. Les câbles sortent de cette boîte en traversant une sorte de presse-étoupe garni de caoutchouc.

Système Edison, basses tensions. — Le modèle de canalisation pour distribution à trois fils est constitué de la façon suivante : trois tringles de cuivre, avec interposition entre elles de tresses de chanvre, sont placées dans des tubes en fer forgé qu'on remplit ensuite d'un isolant bitumineux. Ces tubes ont $6^m,23$ de longueur,

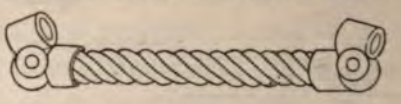


Fig. 206.

ils sont placés sous la chaussée à une profondeur de $0^m,60$, et sont ordinairement recouverts d'une forte planche.

A l'extrémité de chaque tube les tringles dépassent un peu. Pour

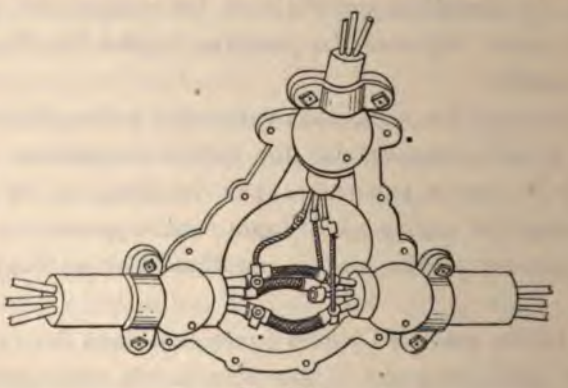


Fig. 207.

les relier entre elles, on se sert d'une sorte de câble flexible (fig. 206), dont les bouts sont munis de manchons où viennent

s'assembler les tringles ; la liaison est consolidée par une soudure.

Des boîtes de jonction en fonte servent pour relier entre elles les sections du conducteur et pour opérer les branchements. La figure 207 montre un appareil de cette nature.

On engage dans la boîte les extrémités des tubes qu'on veut assembler entre eux ; on fait les joints, on visse le couvercle, et on remplit la boîte d'une composition isolante fondue.

Des regards sont disposés de distance en distance.

Ce système est employé en Amérique depuis plusieurs années.

Système Edison, station de l'avenue Trudaine. — La distribution dans ce secteur se fait, comme nous l'avons vu, à basse ten-

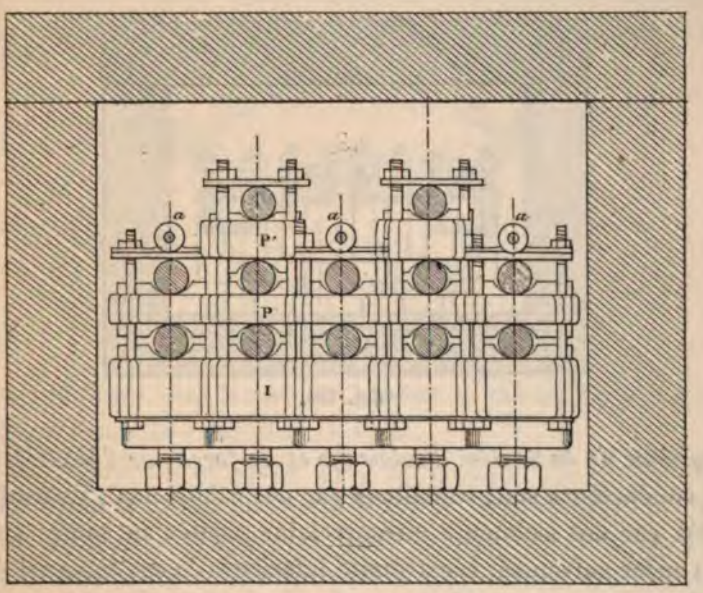


Fig. 208.

sion, par feeders et par le système à trois conducteurs. On avait donc à conduire dans chaque direction un conducteur de distribution et plusieurs feeders venant s'y rattacher en des points successifs, ce qui nécessitait un certain nombre de câbles placés parallèlement. Pour diminuer les dépenses, on les a tous logés dans un

même caniveau en béton. La disposition est indiquée en coupe sur la figure 208.

Un des câbles est posé sur un isolateur-cloche I ; sur ce câble est placée une plaque en porcelaine P échancrée qui sert à le maintenir et qui porte le câble suivant. Celui-ci est maintenu de la même façon, et ainsi de suite. On forme de la sorte une pile verticale de câbles séparés entre eux par des plaques isolantes. Chaque pile est maintenue par 4 boulons en fer enfilés dans des trous percés dans la cloche d'en bas et s'encastrant dans des échancrures ménagées aux angles de chaque plaque. Au sommet est un chapeau maintenu par les 4 boulons. Sur ce chapeau s'appuient des écrous qui serrent tout l'ensemble. En *a*, *a* se trouvent des poulies en porcelaine supportant les fils auxiliaires qui relient les points d'embranchement aux voltmètres placés dans l'usine.

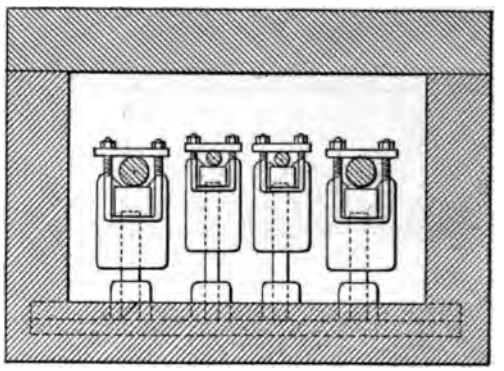


Fig. 209.

Système de la Société d'éclairage et de force par l'électricité. — Les conducteurs sont constitués par des câbles nus ; ils sont supportés par des isolateurs en porcelaine scellés au soufre sur des tiges en fer galvanisé. L'extrémité inférieure de ces tiges est également soudée au soufre dans une traverse en fonte qui leur sert de support commun et qui repose sur le fond du caniveau.

Celui-ci est fait en béton de ciment coulé sur place dans une tranchée sous trottoir. Cette disposition procure une grande élasticité de pose en permettant de donner au caniveau des courbures en certains endroits. Le couvercle est formé de dalles en béton.

Pour fixer le câble sur les isolateurs, on empl

fer galvanisé. Dans ce but, les isolateurs portent deux saillies latérales échancrées à leur partie inférieure pour recevoir la barrette horizontale de l'étrier. Des écrous serrent le câble sur la tête de l'isolateur. La figure 209 représente une coupe transversale du caniveau.

A la traversée des rues, les caniveaux arrivent dans des puits verticaux. Les câbles portés par des isolateurs en porcelaine descendent le long des parois, pour pénétrer dans une galerie souterraine. Des regards sont ménagés à de fréquents intervalles le long du caniveau et spécialement aux points où il change de direction ; ils ont 50 centimètres carrés et sont fermés par des bouchons en fonte asphaltée.

Système de la Saint-James's and Pall Mall Electric Lighting C°, basses tensions. — La distribution est à trois fils et à basse tension.

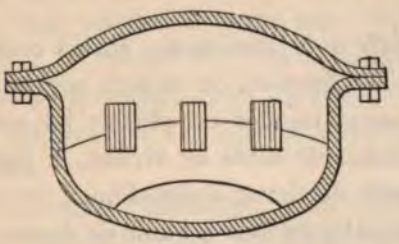


Fig. 210.

Les conducteurs sont formés de bandes de cuivre nu placées sur isolateurs dans des conduites en fonte.

Comme l'indique la figure 210, la conduite est formée d'une cuvette ayant $0^m,25$ de large sur $0^m,15$ de hauteur; elle est fermée par un couvercle cintré avec joint de chanvre et minium. Les longueurs de tuyau sont $1^m,06$; elles sont réunies par des pièces de même profil ayant $0^m,125$ de long ; le joint se fait au plomb.

Des isolateurs en porcelaine sont disposés à des distances de $2^m,75$.

Des regards en briques et ciment sont établis tous les 30 mètres. Les tuyaux y arrivent avec une certaine pente pour l'écoulement de l'eau que l'on vide de temps en tenps.

Pour établir les branchements des habitations, on perce le cou-

vercle et on y visse un tube. Le conducteur du branchement est enveloppé de caoutchouc vulcanisé et soudé au conducteur principal.

Système de la Callender Bitumen Company. — Ce système comporte un caniveau en bois muni de pièces transversales avec encoches pour recevoir les câbles; ensuite la conduite est remplie de bitume. Celui-ci constitue un très bon isolant, et son élasticité lui permet de se prêter aux mouvements du sol.

La Compagnie, dans ses stations centrales, remplace les caniveaux en bois par du fer. Les portions, ayant $1^m,80$ de longueur, sont réunies par des joints à recouvrement avec boulons.

Aux points de branchement sont placées des boîtes en fonte. Les câbles interrompus aux orifices de la boîte sont réunis par une pièce en bronze où s'adapte l'embranchement.

Systèmes adoptés à la station des Halles centrales. — Pour la distribution à faible tension, on se sert sur la voie publique de caniveaux en ciment moulés sur place ; ils sont formés par un mélange de 4 parties de sable de rivière, 1 partie de ciment de Portland et 1 partie de chaux hydraulique ; ce mélange est comprimé dans des moules en bois à l'aide de dames. Le caniveau est recouvert par des dalles, et il est disposé un peu en pente pour l'écoulement de l'eau d'infiltration que des puisards conduisent à l'égout.

Des cadres en bois distants de $1^m,50$ sont encastrés dans la maçonnerie ; ils portent sur les côtés des crochets en fer vitrifié, dans lesquels reposent les câbles.

A la traversée des rues et des chaussées sont établies des galeries dans lesquelles un homme peut descendre pour la visite.

Quant à la distribution par courants alternatifs, une partie de la canalisation est placée sous trottoirs, une autre partie dans l'égout. Pour cette dernière portion, on a adopté des câbles à deux conducteurs *concentriques;* cette disposition a pour but d'éviter les effets d'induction sur les lignes télégraphiques et téléphoniques situées à proximité. Le câble est placé dans une moulure en bois enclavée dans la maçonnerie de l'égout. Quand il passe sous les trottoirs

ils se dédouble et il est alors posé dans des moulures en bois et des caniveaux en ciment.

Le câble concentrique est constitué comme il suit : une âme comportant plusieurs fils en cuivre de 2 millimètres de diamètre ; par-dessus deux couches de caoutchouc pur ayant une épaisseur totale de 1 millimètre ; plusieurs couches de caoutchouc vulcanisé présentant une épaisseur de 8 millimètres ; deux rubans caoutchoutés enroulés en sens inverse. Puis vient la seconde couche de fils de cuivre.

Au-dessus on trouve : deux couches de caoutchouc pur ; plusieurs couches de caoutchouc vulcanisé de 3 millimètres d'épaisseur ; deux rubans caoutchoutés enroulés en sens inverse ; une couche de chanvre imprégné de composition résineuse ; enfin des rubans de coton enduits de goudron. Le câble est protégé par une armature en plomb de 25 millimètres d'épaisseur, avec un fort guipage de fil enduit de goudron.

Le câble à un seul conducteur comporte : 19 brins de cuivre ayant 2 millimètres de diamètre, étamés ; plusieurs couches de caoutchouc vulcanisé présentant une épaisseur de 4 millimètres ; une couche de 3 millimètres de chanvre imprégné ; deux rubans enduits de goudron.

La résistance d'isolement kilométrique du câble concentrique est d'environ 2 000 megohms entre les câbles, et 1 000 megohms entre les câbles et la terre. Celle du câble à un seul conducteur est d'environ 3 000 megohms.

Système Siemens, hautes tensions. — Pour les hautes tensions, Siemens emploie des câbles concentriques, composés de deux séries de fils dont l'une est placée au centre et l'autre à la circonférence. Autour du noyau de cuivre central, on met une couche épaisse de jute qui est imprégné d'un bitume additionné d'huile lourde ; le second rang de fils de cuivre est placé sur cet isolant ; puis on applique une seconde couche isolante et un tube de plomb. Ce dernier est recouvert d'un guipage, puis d'un double enroulement de bandes de fer en spirales, et enfin d'une couche de fil de jute. Ces câbles se posent directement dans le sol sans aucune protection.

Des boîtes sont disposées pour les liaisons et les embranchements ; elles sont formées de deux parties assemblées par des boulons. Après avoir fait le joint, on ferme la boîte et on la rem-

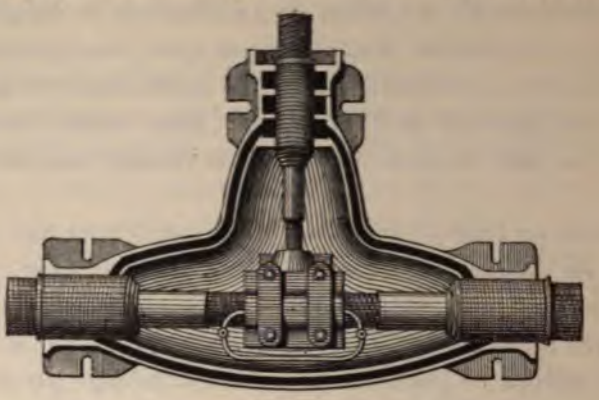


Fig. 211.

plit d'huile lourde par un orifice destiné à cet usage. La disposition est représentée par la figure 211.

A Rome et à Milan, on s'est servi avec avantage des câbles concentriques pour les tensions de 2 000 volts.

Câbles Ferranti pour distribution avec transformateurs. — Avec les hautes tensions résultant de la distribution par transformateurs, il est indispensable que les conducteurs soient parfaitement

Fig. 212.

isolés. Les câbles à deux conducteurs concentriques sont d'un emploi avantageux dans ce cas. La figure 212 représente le modèle de câble employé par M. Ferranti.

Un tube en cuivre A de 6 mètres de long est recouvert d'une série de bandes en papier C imprégnées de matière isolante. Au-dessus de cette couche est emmanché à force un tube B en cuivre, de même longueur que A. B est recouvert du même isolant, et le tout est renfermé dans un tube en fer D servant d'enveloppe protectrice.

M. Ferranti est d'avis qu'il vaut mieux composer l'isolant de plusieurs couches successives que de le faire d'un bloc de pâte. Avec ce dernier système, une fissure peut exister dans l'épaisseur de la masse, tandis qu'il y a peu de chance que plusieurs couches superposées soient toutes défectueuses au même endroit. Le papier enduit d'un mélange d'huile, de soufre et de paraffine, donne un isolant qui résiste aux plus fortes tensions.

On forme ainsi des bouts de tube ayant 6 mètres de long. Pour les raccords, chaque tube porte une extrémité mâle et une femelle s'emboîtant l'une dans l'autre, comme l'indique la figure. Pour compléter l'assemblage, on place dans A une tringle en cuivre *m*, et on opère le rapprochement avec une presse hydraulique transportable. Le tout est ensuite recouvert d'un manchon en fer.

Pour les courbes, on emploie une machine à cintrer analogue à celles qui servent pour les rails de chemin de fer.

Câble Ménier concentrique pour courants alternatifs à haute tension. — Le conducteur central comprend 19 fils en cuivre de $1^{mm},9$ de diamètre ; il est isolé par deux couches de caoutchouc naturel et deux couches de caoutchouc vulcanisé ; le tout est recouvert de deux rubans caoutchoutés et d'un enduit spécial.

Puis vient le second conducteur formé de 18 torons de 3 fils, ayant $0^{mm},7$ de diamètre. Ce conducteur est isolé comme le premier.

Ce câble est recouvert avec un tube en plomb de $2^{mm},5$ d'épaisseur, une couche de jute goudronnée et une armature en fil de fer galvanisé. Le tout est enveloppé d'une seconde couche de jute enduit d'une composition bitumineuse.

Le diamètre extérieur a $0^{m},055$. Il pèse 8 700 kilogrammes par kilomètre. Il peut être posé directement en tranchée. Ce câble résiste très bien à un courant alternatif de 5 000 volts.

320. Prix d'une canalisation. — Il est difficile de donner des indications précises sur le prix d'une canalisation souterraine, car les éléments qui constituent un pareil prix sont trop variables. Mais voici quelques chiffres que nous empruntons à M. Eric Gérard (*Leçons sur l'électricité*), ils suffisent pour montrer l'importance de cette question et pour expliquer toutes les tentatives que

l'on a faites pour diminuer les frais de cette nature. En outre, ils permettent d'établir une comparaison entre quelques-uns des systèmes usités.

Dépenses de premier établissement d'un décamètre de conducteurs doubles, pour circuits à haute tension, sous les trottoirs de Londres.

	7 fils cordés	19 fils cordés	19 fils cordés	19 fils cordés	37 fils cordés	2 cordes de 37 fils	4 cordes de 37 fils	6 cordes de 37 fils
SECTIONS EN MILLIMÈTRES CARRÉS	14,6	50	104	161.25	322	645	1290	1935
Prix du cuivre à 1 fr. 80 le kg. .	4,73	16,20	34,60	51,46	118,00	216	408	614
Prix de l'isolement	12,30	27,80	68,00	98,20	194,00	388	775	1135
Enveloppe de bitume et ciment, main-d'œuvre de pose, tranchée et réfection du trottoir, regards et boîtes de distribution, ingénieur et surveillants	130,00	145,00	170,00	170,00	194,50	233	370	480
Total par décamètre (francs) .	147,03	189,00	272,60	319,60	506,50	837	1553	2229

Dépenses d'établissement de conducteurs doubles en cuivre nu portés sur des isolateurs dans un caniveau sous trottoirs.

SECTIONS EN MILLIMÈTRES CARRÉS	161 25	322	645	1290	1645	1935
Prix du cuivre à 1 fr. 80 le kg.	51,40	118	216	408	520	645
Pose, isolateurs, regards et boîtes de raccordement, caniveau de 48cm sur 30cm, en briques et ciment, réfection du trottoir, ingénieur et surveillants.	204,00	240	240	240	240	250
Total par décamètre (francs).	255,40	358	456	648	760	895

321. Résultats économiques des stations centrales. — Il est à peu près impossible d'établir d'une manière générale le prix de revient de l'éclairage électrique par stations centrales. Il dépend, en effet, de circonstances multiples : importance de la station, étendue du réseau, système de distribution adopté, nature de la force motrice, durée moyenne de l'éclairage, charges imposées par les municipalités, etc., qui peuvent le faire varier dans des proportions considérables.

Tout ce que nous pouvons dire, c'est que le plus souvent l'exploitation d'une station centrale n'est pas aussi rémunératrice qu'on se l'imagine ; l'expérience l'a déjà prouvé plusieurs fois. L'insuccès financier de ces tentatives ne tient aucunement à l'insuffisance des appareils électriques employés ; il est dû à d'autres causes dont nous allons indiquer les principales.

Les stations centrales sont plus coûteuses à installer que les établissements isolés ; elles exigent un local spécial et une canalisation d'un prix très élevé ; la puissance des machines doit être telle qu'elles puissent desservir toutes les lampes du réseau, bien que, dans la plupart des cas, les deux tiers seulement de ces lampes fonctionnent simultanément. Enfin les frais d'entretien, de personnel, de surveillance, sont naturellement supérieurs aux dépenses de même genre observées dans les installations privées. Il n'est donc pas étonnant que la lumière électrique, qui dans ces installations est d'un emploi économique, devienne chère lorsqu'il s'agit de la distribuer au moyen de stations centrales.

En outre, il est un point particulièrement utile à signaler, c'est que la consommation moyenne annuelle de la lumière par bec est beaucoup moins élevée qu'on le pense, et surtout qu'on le suppose dans les calculs. Les compagnies de gaz peuvent fournir à cet égard quelques indications : si l'on rapproche du total des becs de gaz alimentés le total des recettes provenant de la vente du gaz, sans même déduire la consommation pour cuisine, chauffage et force motrice, on constate qu'à Paris, par exemple, un bec ne donne pas par an 40 francs de recette brute ; en province, ce chiffre doit être sensiblement abaissé.

L'électricité ne trouve pas, comme le gaz, un appoint considérable de recettes dans la vente de sous-produits : le maximum

des recettes de l'exploitation se trouve donc immédiatement déterminé, car il est peu probable que le consommateur moyen dépense plus dans l'un que dans l'autre système d'éclairage.

Si d'autre part on établit l'ensemble des frais inséparables d'une entreprise de ce genre, amortissement et entretien, force motrice, personnel, frais généraux, on arrive promptement à se convaincre qu'il faut opérer sur une surface de faible étendue où l'on pourra rencontrer un nombre suffisant de gros consommateurs d'éclairage. Il est rare que de pareilles circonstances soient réalisées.

En résumé, le caractère essentiel d'une station centrale est de renfermer un matériel de machines considérable qui n'est utilisé chaque jour que pendant quelques heures. Le fait a été mis en évidence aux États-Unis.

On a relevé à Boston la consommation des abonnés pendant les vingt-quatre heures, aux différents jours de la semaine, et construit les courbes correspondantes. A simple vue, on remarque que, sauf pendant deux ou trois heures, de 4 à 7 heures, l'usine ne travaille pas en plein : dans la semaine, c'est à peine si la consommation totale atteint le tiers de ce que les machines sont en mesure de fournir, et le dimanche on n'arrive même pas au dixième. Les indications suivantes permettent de se faire à ce sujet des idées très exactes :

De 1 à 7 heures du matin, la courbe est presque une ligne droite correspondant à 250 ampères ; elle se relève vers 7 h. 30, par suite de la mise en marche de moteurs électriques, et reste au voisinage de 450 ampères jusqu'à midi. L'heure du déjeuner, en admettant que les habitudes soient les mêmes que chez nous, est marquée par un léger abaissement au-dessous de 400 ampères. Il y a relèvement régulier de 1 à 3 h. 30, moment où la courbe passe assez brusquement de 650 à 1900 ampères environ, pour redescendre à 1350 ampères vers 6 h. 15. La fermeture des magasins et l'heure du dîner sont nettement indiquées. Puis, de 7 à 8 heures, la consommation revient à 1450 ampères, pour redescendre de 8 h. 30 jusqu'à minuit où le minimum de 200 ampères est atteint.

En d'autres termes, pendant dix-huit heures sur vingt-quatre, la moitié au moins et les deux tiers au plus du matériel de la station ne trouvent pas leur emploi.

A Berlin, on n'admet pas que le nombre de lampes allumées simultanément dépasse 70 p. 100 du nombre total, et l'on compte pour l'éclairage moyen 700 heures par lampe et par an. En Angleterre, on admet trois à trois heures et demie d'éclairage par lampe et par jour. Ce résultat en dit plus long que tous les raisonnements pour démontrer la nécessité de compléter l'éclairage par un autre service. On ne peut y arriver que de deux manières : il faut ou trouver une consommation du courant électrique pendant les heures du jour pour l'ensemble du matériel existant, ou inventer un moyen d'emmagasiner l'électricité qui permette de travailler les vingt-quatre heures avec un matériel restreint. Les Américains ont en général préféré la première de ces deux solutions, ainsi que nous le verrons plus loin dans le chapitre de la *Transmission électrique de la force*. Mais il ne faut pas s'exagérer les résultats qu'on peut en attendre.

Ainsi en supposant pour le moteur électrique un rendement de 90 p. 100 et en admettant qu'on vende le kilowatt à Paris 0 fr. 40, ce qui est loin de la réalité, le prix du cheval-heure serait 0 fr. 33. Or, il est à remarquer qu'un moteur à gaz dépense environ un mètre cube par cheval-heure. Au prix de 0 fr. 30 le mètre, le cheval revient donc à 0 fr. 30. La dépense pour le graissage et pour l'amortissement est à peu près la même dans les deux cas.

La consommation des stations centrales a encore donné lieu à une autre observation intéressante : dans l'usine de Mauerstrasse, à Berlin, où l'on enregistre chaque jour avec soin la consommation d'électricité, on a remarqué qu'elle variait comme la température; elle monte et descend avec le thermomètre. Ce fait, qui peut paraître assez curieux, est cependant facile à expliquer : les becs de gaz ayant été conservés presque partout à côté des lampes à incandescence, on allume les premiers lorsqu'il fait froid et quand on veut à la fois chauffer et éclairer les appartements ; en été, au contraire, l'électricité reprend l'avantage.

Les faits précédents montrent que la lumière fournie par les stations centrales revient aujourd'hui à un prix assez élevé. Elle devra être considérée comme un luxe et payée comme telle, tant que le matériel de l'usine restera inutilisé le jour et ne travaillera en moyenne que pendant trois ou quatre heures chaque soir.

QUATRIÈME PARTIE

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE LA FORCE

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'UNE TRANSMISSION

322. Réversibilité des machines électriques. — Comme nous l'avons dit précédemment, c'est sur la réversibilité des machines électriques qu'est basée la transmission électrique de la force à distance. Rappelons-en le principe en quelques mots.

Une dynamo produit un courant électrique lorsqu'on imprime à son anneau un mouvement de rotation. Réciproquement, cet anneau se met à tourner spontanément si l'on envoie dans la machine un courant provenant d'une autre source quelconque d'électricité.

Supposons maintenant qu'on prenne deux machines et qu'on les réunisse au moyen d'un fil métallique. Si nous faisons tourner l'une d'elles, elle donne naissance à un courant qui traverse le conducteur, arrive à l'autre machine et la met en mouvement, en la rendant susceptible d'actionner un outil et de fournir un travail utilisable. De ces deux dynamos, la première est nommée la *génératrice,* la deuxième la *réceptrice.*

Comme le fil conducteur qui relie les deux appareils peut avoir une grande longueur, sans que l'expérience cesse d'être réalisable, on voit qu'il est possible de transmettre la force à distance, ce qui permet d'utiliser certaines forces naturelles restées jusqu'ici

sans emploi et de les amener en partie dans les centres industriels.

323. Expérience de Vienne en 1873. — C'est à M. Hippolyte Fontaine qu'est due l'idée première de la transmission électrique de la force. L'expérience mémorable dans laquelle il la réalisa fut faite, en 1873, à l'Exposition de Vienne. Elle portait sur deux machines Gramme réunies par un conducteur métallique de 1100 mètres de longueur ; la génératrice était mue par un moteur à gaz, système Lenoir, et la réceptrice actionnait une petite pompe centrifuge de MM. Neut et Dumont.

Cette expérience, qui a été le point de départ d'une nouvelle application de l'électricité, excita un vif intérêt. Elle fut immédiatement étudiée et publiée, et l'on n'hésita pas à dire que « de cette combinaison mécanique nouvelle devait sortir une révolution industrielle et économique ».

Les applications de cette découverte se firent pourtant attendre. La première en date n'eut lieu en effet qu'en mars 1877, à l'atelier de la direction d'artillerie de Saint-Thomas-d'Aquin. Deux dynamos Gramme transmettaient la force motrice à une machine à diviser, placée dans un pavillon situé à 50 ou 60 mètres du moteur à vapeur.

La seconde application du principe de la transmission de la force à distance fut faite, en 1878, par M. Ernest Cadiat dans les ateliers que la Société du Val-d'Osne possède à Paris. Il avait à commander un outil situé à 150 mètres du moteur de l'usine et placé de telle sorte que la disposition du terrain rendait toute transmission mécanique impossible. Il utilisa deux machines Gramme type normal qui avaient été destinées d'abord à l'éclairage des magasins, et les réunit par deux fils de cuivre de 3 millimètres placés en l'air sur des isolateurs comme les fils télégraphiques. Le travail mesuré au frein de Prony sur l'arbre de la réceptrice fut trouvé égal à 50 kilogrammètres. C'était la première tentative ayant un caractère vraiment pratique ; aussi fut-elle accueillie avec succès par le monde industriel.

Depuis cette époque, les applications se sont multipliées, et, en les examinant, nous verrons quels sont les résultats actuellement

acquis. Mais, avant d'entreprendre cette étude, nous avons à exposer les calculs théoriques sur lesquels reposent la transmission électrique de la force et la construction des moteurs.

324. Force contre-électromotrice de la machine réceptrice. — Prenons une source d'électricité, pile ou machine, de force électromotrice E, et relions-la par un conducteur métallique à une machine électrique. Cette dernière servira de réceptrice et prendra un mouvement de rotation. Dans ces conditions, le travail total T_t de la source est employé en partie à vaincre la résistance du circuit avec production de chaleur, et en partie à produire un travail utile T_u dans la réceptrice, de sorte que nous pouvons écrire, en appelant i l'intensité et R la résistance totale du circuit,

$$T_t = Ri^2 + T_u.$$

Nous savons d'ailleurs que

$$T_t = Ei.$$

Par suite

$$Ei = Ri^2 + T_u$$

ou

$$E = Ri + \frac{T_u}{i}.$$

Le produit Ri n'est plus égal à la force électromotrice, comme dans le cas où le courant n'a qu'une action calorifique; il en diffère de la quantité $\frac{T_u}{i}$ que nous représenterons par e en écrivant :

$$e = \frac{T_u}{i}; \qquad (1)$$

nous avons par suite :

$$E = Ri + e. \qquad (2)$$

Nous arrivons ainsi à la notion d'une force contre-électromotrice développée dans la machine réceptrice, dont il est d'ailleurs facile d'expliquer l'existence. Dès que le moteur commence à tourner sous l'influence du courant fourni par la génératrice, il tend à fonctionner pour son propre compte comme une génératrice et à produire un courant de sens inverse à celui qu'il reçoit ; en

d'autres termes, il développe une force électromotrice opposée à celle de ce courant ou, suivant l'expression adoptée, une force contre-électromotrice. Il résulte de là que cette force contre-électromotrice est complètement analogue à la force électromotrice d'une génératrice ; comme elle, elle dépend de la vitesse et de l'intensité du champ magnétique.

L'existence de cette force peut être mise en évidence par l'expérience suivante. On place en circuit quelques éléments de pile ayant une faible résistance, un petit moteur électrique et un galvanomètre : les indications du galvanomètre ne sont pas les mêmes si on cale le moteur ou si on le laisse tourner, et elles diminuent à mesure que le travail demandé au moteur augmente.

La loi de Ohm n'est pas applicable dans ce cas, et ce n'est plus la force électromotrice de la source, mais bien cette force diminuée de la force contre-électromotrice de la machine réceptrice qui est égale au produit de l'intensité par la résistance ; nous retrouvons ainsi l'énoncé du second théorème de Kirchhoff donné au § 6.

En examinant l'équation (2), on voit de suite que la force contre-électromotrice de la réceptrice ne peut jamais dépasser celle de la génératrice ; elle ne l'égalerait même que dans deux cas limites non réalisables, celui où les conducteurs et les machines n'auraient aucune résistance électrique et celui où l'intensité du courant serait nulle.

325. Travail utile. — D'un autre côté, l'équation (1) prouve que le travail utile d'un moteur électrique est égal au produit de l'intensité par la force contre-électromotrice de ce moteur.

Tirons la valeur de i de l'équation (2) et portons-la dans (1) ; nous obtenons

$$T_u = \frac{e\,(E - e)}{R}. \qquad (3)$$

Cette expression est susceptible d'un maximum, puisque c'est le produit de deux facteurs e et $E - e$, dont la somme est constante. Ce maximum a lieu pour

$$e = \frac{E}{2}.$$

Donc le travail utile est maximum lorsque la force contre-électromotrice de la réceptrice est égale à la moitié de la force électromotrice de la source.

En portant cette valeur de e dans (2), on a

$$E = iR + \frac{E}{2}$$

$$i = \frac{E}{2R}.$$

Si maintenant nous calons l'anneau de la réceptrice de manière à l'empêcher de tourner, le seul travail du courant consiste à vaincre la résistance du fil; il est donc moindre que lorsque l'anneau est libre, et l'intensité prend une valeur I supérieure à i, qui est donnée par

$$I = \frac{E}{R}.$$

En comparant I et la valeur de i pour le cas du travail utile maximum, nous voyons que $i = \frac{I}{2}$.

On peut donc dire encore que le travail utile est maximum quand l'intensité du courant existant lorsque la réceptrice tourne est la moitié de l'intensité du courant obtenu lorsqu'elle est au repos.

L'équation (3) montre de plus que le travail utile diminue quand on augmente la résistance du conducteur, c'est-à-dire la distance entre les deux machines, toutes choses égales d'ailleurs.

Nous verrons plus loin les différents moyens proposés pour remédier à cet inconvénient.

326. Rendement électrique d'une transmission. — Ce rendement est le rapport du travail utile T_u produit dans la réceptrice au travail électrique total T_t dépensé dans la génératrice.

Nous pouvons facilement avoir sa valeur; en effet

$$T_u = ei$$
$$T_t = Ei$$

d'où

$$\frac{T_u}{T_t} = \frac{e}{E}. \qquad (4)$$

Le rendement électrique d'une transmission de force est égal au rapport de la force contre-électromotrice de la réceptrice à la force électromotrice de la génératrice.

Malgré la précision de cette définition, ce rendement a donné lieu à bien des méprises et soulevé de nombreuses discussions. Nous croyons donc devoir insister à son sujet.

Il faut d'abord remarquer que le rendement électrique est complètement différent du travail utile. Le travail utile a un maximum que nous venons d'étudier et qui a lieu lorsque $e = \frac{E}{2}$, c'est-à-dire quand le rendement électrique est de 50 p. 100. Il n'en est plus de même du rendement électrique, qui part de 0 pour une valeur nulle de e ou du travail utile, et croît régulièrement jusqu'à 1, pour le cas limite où $e = E$ et où le travail utile est encore nul.

Dans une installation de transmission de force, il y a donc deux points parfaitement distincts à considérer : 1° le travail utile qu'on peut rendre maximum, mais aux dépens du rendement électrique, lequel n'est alors que de 50 p. 100 ; 2° le rendement électrique qu'on peut obtenir supérieur à 50 p. 100, mais en produisant un travail utile moins considérable. C'est à l'industriel à examiner lequel de ces deux facteurs a le plus d'importance à ses yeux.

327. — L'expression $\frac{e}{E}$ donnée par l'équation (4) pour la valeur du rendement électrique a conduit M. Marcel Deprez à énoncer le principe suivant, vivement contesté par de nombreux électriciens :

Le rendement électrique d'une transmission de force est indépendant de la résistance du circuit, c'est-à-dire de la résistance qui sépare les deux machines.

Ce résultat peut paraître singulier au premier abord ; il semble, en effet, que la quantité de chaleur produite dans le conducteur métallique doit croître avec la longueur de ce dernier et, par suite, augmenter les pertes. Mais, comme l'a fait observer M. Deprez, il faut aussi tenir compte de ce que cette production de chaleur est proportionnelle au carré de l'intensité, et que cette intensité diminue lorsque la longueur du conducteur devient plus grande.

Cependant cette conclusion suppose le cas absolument théorique

d'un isolement parfait de la ligne. Dans les conditions ordinaires de l'expérience, les conducteurs, qu'ils soient portés sur des poteaux ou placés dans le sol, présentent toujours des dérivations à la terre qui occasionnent des pertes du courant. L'intensité n'est plus alors la même dans toute l'étendue du circuit ; sa valeur i dans la machine réceptrice est plus faible que celle i' dans la génératrice, et le rendement a pour expression

$$\frac{ei}{Ei'}$$

et non pas $\frac{e}{E}$, comme nous l'avons dit précédemment.

La règle donnée par M. Deprez, que le rendement est indépendant de la distance, n'est donc vraie qu'en théorie. Il serait dangereux de l'admettre dans la pratique et d'installer des applications de transmission de force en basant ses calculs sur les résultats auxquels elle conduit.

328. — Il existe encore une autre expression du rendement électrique indiquée par M. Deprez. Les deux machines étant supposées identiques et les champs magnétiques ayant la même intensité, les forces électromotrices sont entre elles dans le même rapport que les vitesses des anneaux. Par conséquent, le rendement électrique est égal au rendement des vitesses.

Comme précédemment, cette loi n'est vraie que dans le cas théorique où l'intensité du courant est la même dans les deux dynamos ; sur ce point encore, les expériences ont démontré qu'il y avait loin de la théorie à la pratique.

329. Rendement mécanique d'une transmission. — Une distinction très importante, sur laquelle nous ne saurions trop insister, est celle que l'on doit faire entre le rendement électrique défini plus haut et le rendement mécanique.

Le rendement mécanique est le rapport entre le travail recueilli au frein sur la réceptrice et le travail dépensé par la génératrice, donné par le dynamomètre. C'est toujours lui que l'on veut désigner quand on parle du rendement sans épithète.

Ce rendement mécanique est de beaucoup le plus utile en pratique. L'industriel, qui se préoccupe de produire un effort, en

partant d'une puissance donnée, s'intéresse peu à la nature de l'intermédiaire employé pour transmettre la force : il a le choix entre divers agents, l'air comprimé, les câbles télédynamiques, l'électricité, et, pour accorder la préférence à cette dernière, il faut qu'il y trouve un avantage mécanique. Pour son appréciation, il a besoin de connaître la force fournie au départ et la force recueillie à l'arrivée, et il se trouve ainsi conduit au rendement mécanique.

Ce rendement mécanique diffère notablement du rendement électrique ; car il compte comme perte l'énergie transformée en chaleur dans les deux machines et le conducteur intermédiaire, celle qui est dépensée par les frottements, etc. Il dépend essentiellement de la résistance du conducteur, c'est-à-dire de la distance, comme le prouve l'expérience suivante, citée par M. Boistel.

On prend deux machines Siemens identiques, qui peuvent produire, à la vitesse de 900 tours, sur un circuit peu résistant, un courant de 58,5 ampères et 168 volts. Si l'on commence par placer ces machines à une faible distance l'une de l'autre, en les réunissant par un conducteur qui ne présente, pour ainsi dire, pas de résistance, on peut obtenir un rendement mécanique de 54 p. 100.

Si l'on intercale entre ces deux machines une résistance de 0,5 ohm, équivalente à un fil de cuivre ayant $4^{mm},5$ de diamètre et 416 mètres de longueur, on n'a plus qu'un rendement de 41 p. 100 du travail absorbé par la génératrice. Si l'on élève la résistance à 1 ohm, en intercalant 833 mètres de ce même fil, le rendement s'abaisse à 28,8 p. 100 ; avec 1,5 ohm de résistance, c'est-à-dire en portant à 1 250 mètres la longueur du conducteur, il tombe à 15,8 p. 100.

La distance des deux machines électriques a donc une influence considérable sur le rendement mécanique d'une transmission de force, et l'on doit bien se convaincre que ce rendement va en diminuant rapidement lorsqu'on éloigne les machines l'une de l'autre, sans changer ni leurs éléments de construction ni le diamètre des conducteurs.

330. Moyens de remédier à l'augmentation de la distance. —

Nous avons trouvé précédemment pour l'expression du travail utile recueilli dans la réceptrice

$$T_u = \frac{e\,(E - e)}{R}$$

et nous en avons conclu que l'augmentation de longueur du conducteur produisait une diminution de ce travail.

Cette équation nous montre qu'il y a deux moyens permettant de transporter une quantité de travail déterminée à une distance aussi grande que possible. On peut, ou diminuer la résistance du conducteur en augmentant son diamètre, ou faire croître les forces électromotrices des machines.

Le premier procédé a été proposé par M. Maurice Lévy, qui l'a indiqué dans une note à l'Académie des sciences, en février 1882, en disant que « la résistance du circuit extérieur peut être rendue très petite, même pour de grandes distances, en prenant du fil très gros ».

Mais les fils bons conducteurs employés dans ce cas ont une valeur pécuniaire beaucoup trop élevée pour qu'on puisse augmenter impunément leurs diamètres. Il y a là une question de frais de premier établissement devant laquelle un industriel est forcé de s'arrêter. En voici un exemple cité par M. Boistel à la Société des Ingénieurs civils. Il s'agissait de transporter, pour l'exploitation de certaines mines du Pérou, une force de 200 chevaux à 50 kilomètres avec un rendement de 33 p. 100. Le prix total de l'installation s'élevait à 1 925 000 francs. Or les machines électriques y figuraient pour 300 000 francs seulement et le conducteur pour 1 625 000 francs. Dans de semblables conditions, les dépenses deviennent beaucoup trop considérables et rendent la réalisation d'un pareil projet tout à fait impossible. L'augmentation de diamètre du conducteur ne donne donc pas une solution pratique du problème.

Le second procédé, employé pour combattre l'influence de la distance, consiste à faire croître les forces électromotrices des machines. C'est le système des *hautes tensions*, préconisé par M. Marcel Deprez. D'après lui, pour obtenir le même travail utile, quelle que soit la longueur du conducteur intermédiaire, il suffit

que les forces électromotrices varient proportionnellement à la racine carrée de la résistance du circuit.

En d'autres termes, si, avec les quantités R, e, E, nous obtenons un certain travail utile T_u, pour avoir ce même travail avec d'autres valeurs R', e', E', il faudra prendre e' et E' tels qu'elles satisfassent aux deux équations

$$\frac{e'}{e} = \sqrt{\frac{R'}{R}} \qquad (5)$$

$$\frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{R'}{R}}. \qquad (6)$$

En effet, soit T'_u le travail produit dans le second cas, nous avons :

$$T_u = \frac{e\,(E - e)}{R} \qquad T'_u = \frac{e'\,(E' - e')}{R'}.$$

Substituons dans cette dernière équation les valeurs de e', E', tirées des deux conditions (5) (6) :

$$T'_u = \frac{e\sqrt{\frac{R'}{R}}\left(E\sqrt{\frac{R'}{R}} - e\sqrt{\frac{R'}{R}}\right)}{R'} = \frac{e\,\frac{R'}{R}\,(E - e)}{R'}$$

$$T'_u = \frac{e\,(E - e)}{R} = T_u.$$

La théorie, comme on le voit, démontre l'avantage des courants à haute tension pour le transport de la force à grande distance. Les partisans des basses tensions s'appuient sur les arguments suivants : danger de la manœuvre des machines à haut potentiel, difficultés d'accouplement de ces dynamos, nécessité d'un très grand isolement, impossibilité de livrer à l'abonné un courant d'une tension supérieure à 1 000 volts.

Mais les récentes expériences de M. Brown ont démontré qu'on pouvait dépasser les limites de tension qu'on s'était imposées jusqu'à présent. Grâce aux transformateurs, il est possible de produire des courants à des tensions très élevées et de les réduire ensuite pour les livrer au public. Enfin les moteurs alternatifs ont fourni un nouveau moyen d'utiliser ces courants. A la fin de ce chapitre, nous reviendrons sur ces intéressantes questions.

PROPRIÉTÉS DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

331. — Nous venons d'étudier les principes généraux qui régissent une transmission électrique de la force ; il nous reste maintenant à considérer les conditions de construction et d'emploi des machines destinées à transformer l'énergie électrique en travail mécanique. Ces machines sont ordinairement désignées sous le nom de *moteurs électriques*.

Les dynamos que nous avons examinées plus haut, étant réversibles, sont toutes des moteurs électriques. Dans la pratique cependant, on n'a guère employé jusqu'à ce jour à cet usage que les dynamos à courant continu ou à courants redressés, les moteurs à courants alternatifs dont nous parlons plus loin étant d'invention trop récente. Encore l'expérience a-t-elle démontré que ce ne sont pas les meilleures dynamos qui font les meilleurs moteurs, et que certains détails de construction doivent être modifiés suivant le service auquel les machines sont destinées.

Les conditions à remplir dans les deux cas sont en effet différentes. La dynamo génératrice doit pouvoir travailler continuellement sans dégagement de chaleur dans ses différentes parties, ne pas souffrir d'un excès momentané de courant, et fonctionner également bien sous des variations extrêmes de la production extérieure ; enfin son poids est une question secondaire. Ces qualités ne sont pas nécessaires chez un moteur ; celui-ci doit au contraire travailler par intermittences et son poids a une très grande importance pour toutes les applications de traction.

Dans les premiers temps, on employait des génératrices et des réceptrices identiques ; ce procédé n'est plus usité que pour les installations où les machines sont fixes, et encore vaudrait-il mieux, dans ce cas, avoir des réceptrices plus appropriées au service qui leur est demandé. Partout ailleurs le moteur est spécialement combiné en vue de son application ; aussi aurons-nous à décrire plus loin certains types de moteurs.

332. Rendement d'une dynamo réceptrice. — Ainsi que nous l'avons dit dans l'étude des dynamos génératrices, les expressions

des rendements industriel et électrique ne sont plus les mêmes lorsque la dynamo est employée comme réceptrice.

Rendement industriel. — Le rendement industriel d'une dynamo réceptrice est le rapport du travail mécanique recueilli sur l'arbre à l'énergie électrique fournie aux bornes et absorbée par la machine.

Le travail mécanique utile se mesure sur l'arbre au moyen du frein de Prony. L'énergie électrique absorbée par la machine s'exprime en multipliant la différence de potentiel aux bornes par l'intensité, et divisant par l'accélération de la pesanteur.

Rendement électrique. — Le rendement électrique d'une dynamo réceptrice est le rapport de l'énergie électrique fournie aux bornes diminuée de l'énergie absorbée par la résistance intérieure de la machine, à l'énergie électrique fournie aux bornes.

Soient E_d la différence de potentiel aux bornes, R_a la résistance de l'armature, et R_e celle de l'électro; le rendement électrique a pour expression dans le cas de l'excitation en série,

$$\frac{E_d I - I^2 (R_a + R_e)}{E_d I} \quad \text{ou} \quad \frac{E_d - I (R_a + R_e)}{E_d};$$

dans le cas de l'excitation en dérivation, en appelant I_a l'intensité dans l'armature et I_e dans l'électro,

$$\frac{E_d I - I_a R_a - I_e R_e}{E_d I};$$

dans le cas de l'excitation à double enroulement, en appelant R'_e la résistance des bobines en série et R''_e celle des bobines en dérivation,

$$\frac{E_d I - I_a (R_a + R'_e) - I_e R''_e}{E_d I}.$$

333. Sens de la rotation d'une génératrice et d'une réceptrice. — Pour un courant et une machine donnés, le sens de la rotation varie avec le mode d'excitation de la machine.

Considérons d'abord le cas d'une magnéto ou d'une dynamo à excitation indépendante ou en série. Lorsque cette machine est

génératrice, les réactions qui se produisent entre les électros et l'anneau s'opposent au mouvement de rotation ; c'est la conséquence de la loi de Lenz. Si nous nous servons de cette machine comme réceptrice et si nous y envoyons un courant de même sens que précédemment, les champs magnétiques des électros et de l'anneau conservent leurs signes, et leurs réactions sont de même sens ; or, comme l'anneau est libre, il obéit à ces réactions et prend un mouvement inverse de celui qu'il avait lorsque la dynamo fonctionnait comme génératrice.

Il n'en est plus de même si l'on prend une dynamo excitée en

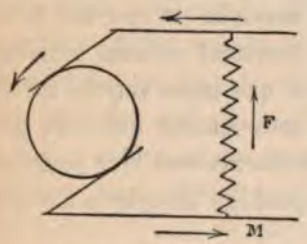


Fig. 213.

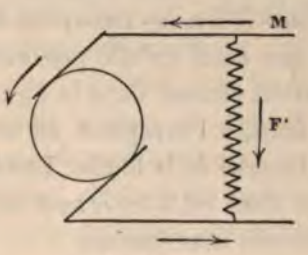


Fig. 214.

dérivation. En effet, par suite même du montage des électros en dérivation, si le courant conserve son sens dans l'anneau lorsque de génératrice la machine devient réceptrice, il en change dans l'électro. Quand la machine marche comme génératrice, le courant circule, par exemple, dans le sens M (fig. 213), et il a dans l'électro la direction F. Prenons cette machine comme réceptrice (fig. 214) et envoyons-lui le courant M. Le sens sera le même que précédemment dans l'anneau ; mais dans l'électro il aura la direction F'. Le champ des électros change de signe, tandis que le champ de l'anneau n'en change pas ; les réactions s'exercent donc en sens contraire de celles qui se produisaient dans la génératrice, et, comme celles-ci s'opposaient au mouvement, celles-là se produiront dans le sens même du mouvement. La machine tournera donc dans le même sens, qu'elle soit employée comme génératrice ou comme réceptrice.

Il résulte de là que le sens de rotation d'une dynamo à double enroulement doit varier suivant la proportion relative des deux fils de l'inducteur. Si l'action du fil en série l'emporte sur celle du

fil en dérivation, la dynamo tournera dans le même sens qu'une machine excitée en série ; dans le cas contraire, elle agira comme une machine excitée en dérivation.

334. Calage des balais. — Dans notre étude des machines dynamos, nous avons vu que les balais devaient être calés *en avance* dans le sens du mouvement de rotation. Cette règle ne subsiste pas pour les moteurs.

En effet, reprenons la figure 100, page 208, et supposons qu'il s'agisse d'une dynamo excitée en série. (Le même raisonnement s'appliquerait à une magnéto ou à une dynamo à excitation indépendante.) Si nous envoyons dans la machine un courant de même sens que celui qu'elle produisait en tournant comme génératrice, rien n'est changé dans la figure, ainsi que nous venons de le dire plus haut, à l'exception du sens du mouvement qui aura lieu en sens inverse de la flèche. Les balais conserveront leur position ; ils seront donc calés *en retard* sur leur position théorique par rapport au sens du mouvement.

Un raisonnement analogue conduirait au même résultat avec une dynamo excitée en dérivation. Enfin le fait, étant vrai pour les dynamos en série et en dérivation, le sera aussi pour les dynamos à double enroulement.

On peut donc dire d'une manière générale que les balais d'une génératrice sont calés *en avance*, et ceux d'une réceptrice *en retard*. C'est là un point important, sur lequel nous appelons d'autant plus l'attention qu'il a souvent donné lieu à de fausses interprétations.

De même que dans les génératrices, le calage des balais diffère dans les réceptrices suivant les proportions relatives des champs magnétiques des électros et de l'anneau. Or, dans les réceptrices, ces proportions relatives peuvent varier énormément : l'angle de calage est donc lui-même très variable.

Si le champ des électros est puissant et celui de l'anneau faible, le décalage peut être négligeable ; au contraire, si le champ des électros est peu intense par rapport à celui de l'anneau, le décalage est très grand. Il arrive même dans ce cas que, la répartition des champs magnétiques variant, ainsi que

loin, suivant le travail exécuté par le moteur, ou, pour employer l'expression habituelle, suivant la charge du moteur, ce décalage varie avec cette charge. Il faut alors prendre des précautions particulières pour modifier constamment la position des balais, sans quoi ceux-ci mettraient en court circuit des spires qui sont encore le siège d'une force électromotrice, et il y aurait production d'étincelles.

335. — Le moteur Field employé aux États-Unis rentre dans cette catégorie ; il possède un système de réglage particulier pour le calage des balais dont il est bon de dire quelques mots. L'appareil est basé sur ce principe que, dans un collecteur, les deux lames situées sur le diamètre perpendiculaire au diamètre des balais sont au même potentiel ; un conducteur qui les reliera ne sera donc traversé par aucun courant. Si alors on suppose deux petits balais placés en ces points et montés en circuit avec un petit moteur qui, suivant son sens de rotation, déplace les balais principaux d'un côté ou de l'autre, ce moteur restera immobile tant que les petits balais auront le même potentiel, c'est-à-dire tant que les balais principaux seront exactement sur la ligne neutre. Mais, dès que cette dernière condition ne sera plus remplie ou, en d'autres termes, dès qu'il y aura lieu de procéder à un nouveau calage, les balais secondaires ne se trouveront plus au même potentiel, le moteur auxiliaire se mettra en mouvement et fera tourner les balais principaux jusqu'à ce que ceux-ci aient pris la nouvelle position de calage.

336. Renversement de marche. — Il existe un très grand nombre d'applications où l'on a besoin de renverser la marche d'un moteur, dans les monte-charges, les treuils, les tramways, par exemple. Nous allons indiquer les différents moyens d'obtenir ce résultat.

On pourrait croire qu'il suffit pour cela de changer le sens du courant envoyé dans la machine réceptrice ; mais cette commutation n'est utile que dans le cas d'une magnéto ou d'une dynamo à excitation indépendante ; avec ces machines, en effet, on renverse l'orientation du champ magnétique de l'anneau, tandis que celle des électros reste la même. La réaction résultante change donc, et par suite le sens du mouvement.

Lorsqu'il s'agit au contraire d'une dynamo auto-excitatrice, qu'elle soit excitée en série, en dérivation ou en double enroulement, le renversement du courant ne produit aucun résultat. En effet, ce renversement a lieu aussi bien dans les électros que dans l'anneau, les orientations des deux champs magnétiques sont changées, mais leur action mutuelle, et par suite, le sens du mouvement ne change pas. Il faut, dans ce cas, renverser le courant dans l'une des parties seulement de la machine, soit dans les électros, soit dans l'anneau. Les deux procédés sont également applicables.

1° Le renversement du courant dans l'anneau se fait simplement en changeant la position des balais sur le collecteur. Si la ligne

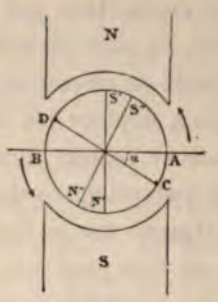


Fig. 215.

Fig. 216.

neutre se trouvait exactement sur le diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles de l'électro, il faudrait tourner les balais de 180° pour que la machine marchât en sens inverse. Mais, en raison du calage qui, comme nous l'avons vu, doit avoir lieu en retard de la position théorique, la rotation à donner aux balais sera seulement de $180° - 2\alpha$, si α est l'angle de calage. Les deux figures 215 et 216, dans chacune desquelles le sens du mouvement de l'anneau est indiqué par une flèche, permettent de s'en rendre facilement compte ; les balais doivent être amenés de la position C D qu'ils occupent dans la figure 215 à la position C D de la figure 216.

Mais cette solution offre un inconvénient, c'est que dans l'une des deux positions les balais se trouvent pris à rebrousse-poil par le collecteur; aussi, à moins de se servir de balais en toile métallique avec lesquels cet inconvénient n'existe pas, est-il préférable

l'employer deux jeux de balais, dont l'un ou l'autre appuie sur le collecteur suivant le sens de rotation.

La figure 217 représente un inverseur de ce système employé

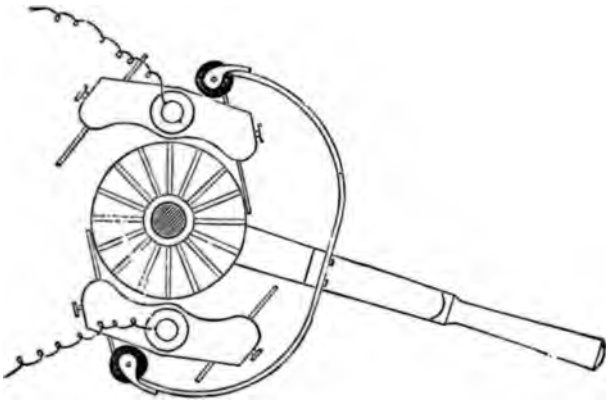


Fig. 217.

par M. Reckenzaun sur le bateau *Electricity*. Le levier de manœuvre commande les porte-balais par l'intermédiaire de deux galets en ébonite ; le fonctionnement de l'appareil se comprend d'ailleurs à la simple vue de la figure.

2° Le renversement de marche s'obtient encore en changeant le

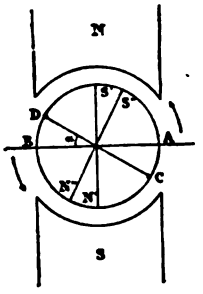


Fig. 218.

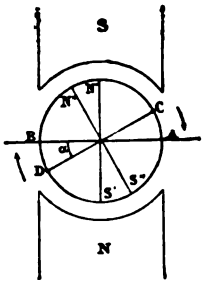


Fig. 219.

sens du courant dans l'électro, mais il faut en même temps modifier le calage des balais et déplacer ceux-ci d'un angle 2α (fig. 218 et 219).

[illegible] peut se faire au moyen d'un levier de [illegible] cations de l'électro et commande

mécaniquement les balais. Mais la machine peut être disposée de manière à assurer elle-même le calage suivant le sens de rotation; il suffit alors d'avoir pour l'électro un simple commutateur que l'on place à distance de la réceptrice, de telle sorte que, dans ce cas, la commande de celle-ci peut se faire d'un point quelconque de l'atelier. Ce résultat est obtenu au moyen du dispositif suivant.

Les balais sont portés par un mécanisme D C E qui est entraîné

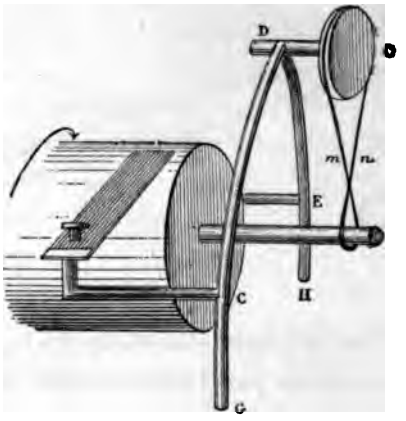


Fig. 220.

par la rotation de l'anneau jusqu'à ce qu'ils soient à la position de calage (fig. 220); cette position est déterminée à l'avance et réglée au moyen de butoirs G, H, qui viennent heurter le bâti de la machine et limitent le mouvement de la pièce C D E. Cette pièce, aux extrémités de laquelle sont les deux balais, est fixée sur l'arbre D commandé par l'arbre de l'anneau au moyen d'une petite corde *m n*.

La figure 220 représente le mécanisme disposé pour la marche de l'anneau dans le sens de la flèche. Si l'on veut changer le sens de rotation, on renverse le courant dans l'électro; l'anneau s'arrête et repart en sens inverse, la corde *m n* entraîne la poulie L, et le système C D E tourne autour de D en amenant les balais à leur nouvelle position de calage; dès qu'ils y sont arrivés, la pièce G bute contre le bâti, la rotation de la poulie L s'arrêt la glisse sans se déplacer sur l'arbre de l'a

337. Constance de la vitesse. — La manière dont se comporte la vitesse d'un moteur électrique est différente suivant les applications. Tantôt elle doit varier avec l'effort, tantôt au contraire elle doit rester constante, quelle que soit la valeur de ce dernier.

1° *Vitesse variable.* Les chemins de fer électriques rentrent dans le premier cas ; il faut en effet, dans l'intérêt des transmissions particulièrement, que le moteur ne prenne son allure que progressivement, de telle sorte qu'au moment du démarrage, c'est-à-dire de l'effort maximum, la vitesse soit très faible et qu'elle aille ensuite en augmentant à mesure que l'effort diminue.

L'emploi d'une dynamo excitée en série avec alimentation sous différence de potentiel constante satisfait à cette condition. En effet, si la charge du moteur augmente, la vitesse diminue ainsi que la force contre-électromotrice qui en dépend ; la différence de potentiel étant constante, l'intensité du courant augmente et par suite le champ magnétique. Donc l'effort qui est fonction de ces deux quantités augmente.

Avec une charge nulle, la vitesse augmente jusqu'à ce que la force contre-électromotrice égale la différence de potentiel aux bornes ; l'intensité et l'effort sont nuls. Au contraire, si la charge augmente indéfiniment, l'effort augmente aussi et la vitesse diminue jusqu'à devenir nulle.

Il est à remarquer que, dans ce cas, l'effort ne dépend que de l'intensité du courant, puisqu'il est fonction de cette dernière et de l'intensité du champ magnétique qui en dépend elle-même, l'armature et l'électro étant reliés en série et traversés par le même courant. Il suffit donc, au moment du démarrage où l'on a besoin d'un effort considérable, d'envoyer dans le moteur un courant de grande intensité.

2° *Vitesse constante.* Dans la plupart des applications, pour les machines-outils, les treuils par exemple, où l'outil ne travaille que d'une manière intermittente, il faut absolument éviter l'emballement du moteur que la suppression de la charge tend à produire.

L'excitation en série est théoriquement impossible dans ce cas, puisque nous avons vu qu'elle donne lieu à une vitesse variable. Il faut donc avoir recours à l'excitation en dérivation ou plutôt à un double enroulement, ainsi que nous allons le montrer.

Il faut tout d'abord remarquer que, lorsqu'il s'agit d'une dynamo excitée en dérivation, la variation du champ magnétique doit se faire en sens inverse de celle de la charge ; si celle-ci augmente, il faut diminuer le champ magnétique, et vice versa.

Il est facile de s'en rendre compte. A toute augmentation de la charge doit correspondre une augmentation d'effort, qui peut être produite de deux manières différentes, par l'augmentation du champ magnétique ou de l'intensité dans l'anneau. Si l'on adopte la première solution, on n'accroît pas seulement l'effort, mais aussi la force contre-électromotrice qui dépend du champ magnétique, de telle sorte que la vitesse tend encore à diminuer. Ce procédé est donc inapplicable, et il faut recourir à l'augmentation du courant de l'anneau, que l'on obtient en diminuant la force contre-électromotrice, c'est-à-dire le champ magnétique.

Toutefois cette régulation ne peut avoir lieu que pour des valeurs de la vitesse comprises entre certaines limites. Si l'on appelle E la différence de potentiel aux bornes, e la force contre-électromotrice, I l'intensité dans l'anneau et r la résistance de celui-ci. On a $I = \frac{E - e}{r}$; et la puissance de la machine est égale à $e\,I$ ou à $e\,\frac{E - e}{r}$. La variation de cette puissance pour une variation de de la force contre-électromotrice, la vitesse étant supposée constante, s'obtiendra en différentiant cette expression, ce qui donne

$$de \times \frac{E - e}{r} - \frac{e \times de}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{de}{r}(E - 2e) ;$$

de étant supposé négatif, il faudra, pour que cette variation soit positive, que le second facteur soit négatif, c'est-à-dire que

$$E < 2e.$$

La diminution du champ magnétique n'augmentera la puissance que lorsque la force contre-électromotrice sera supérieure à la moitié de la différence du potentiel aux bornes, ce qui est d'ailleurs le cas général de la pratique.

Il s'agit donc de faire varier le champ magnétique de la dynamo en sens inverse des variations de la charge. On peut y arriver au moyen d'un régulateur, soit centrifuge, soit mano-
qui modifie la résistance de l'électro.

En général, on préfère se servir d'un double enroulement sur les électros, l'enroulement en série ayant un effet contraire à celui de l'enroulement en dérivation et tendant par suite à désaimanter l'électro. Il est facile de voir ce qui se passe dans ce cas. Lorsque la charge augmente, par exemple, la vitesse tend à diminuer ; par suite, la force contre-électromotrice diminue et le courant de l'armature augmente ; il en résulte que l'action de l'enroulement en série augmente elle aussi, et, comme cet enroulement tend à désaimanter l'électro, le champ magnétique diminue, ce qui, comme nous l'avons vu précédemment, est la condition requise pour augmenter la puissance et ramener la vitesse à sa valeur primitive.

On peut donc arriver, en calculant avec soin les enroulements pour une vitesse déterminée, à avoir une réceptrice parfaitement auto-régulatrice ; mais, en pratique, une pareille machine n'est nécessaire que dans quelques cas particuliers, pour la commande des outils de précision, par exemple ; en général, la vitesse peut sans inconvénient varier entre certaines limites, et le double enroulement a surtout pour but d'empêcher les emballements de la réceptrice.

Il est même certaines applications où l'on peut se dispenser du compoundage et employer simplement une machine en série ; le fait se présente lorsqu'on a à commander un outil qui, en marchant à vide, absorbe presque autant de force qu'en travaillant.

338. Commutateur de mise en marche. — Si, pour mettre en marche un moteur électrique, on lance le courant directement dans l'armature, on risque de la brûler. De plus, lorsqu'il s'agit d'une dynamo excitée en dérivation ou à double enroulement, elle reste immobile dans le premier cas, et se met à tourner dans le second en sens inverse du mouvement qu'elle doit avoir. En effet, au repos, la force contre-électromotrice n'existe pas, et l'armature présente, par rapport à l'électro, une résistance très faible ; elle est donc traversée par le courant tout entier, et l'électro ne reçoit rien ; par suite, le champ magnétique n'existe pas dans une dynamo en dérivation, et avec une dynamo à double enroulement, il prend une orientation inverse de celle qu'il doit avoir. Le résultat est mauvais dans les deux cas.

On évite cet inconvénient en employant un commutateur de mise en marche, c'est-à-dire un rhéostat à manette, au moyen duquel on introduit sur le circuit de l'armature une résistance assez grande au moment où l'on ferme le circuit, résistance qu'on diminue ensuite progressivement.

La même opération doit être faite, mais en sens inverse, lorsqu'on ouvre le circuit.

La disposition est quelque peu différente dans les moteurs de M. Sprague, qui sont tous à double enroulement. Dans ces appareils, l'action de l'enroulement en série est renversée au moment de la mise en marche ; cet enroulement produit donc l'excitation du champ magnétique ; puis, dès que le moteur est en marche et que la force contre-électromotrice commence à se développer, son effet est renversé de nouveau, et il reprend son rôle de régulateur.

DESCRIPTION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, il existe en dehors des machines dynamos déjà étudiées qui peuvent être employées comme réceptrices, des appareils spécialement combinés en vue de cette application. Nous allons en donner une rapide description.

339. Moteur Trouvé, genre Gramme. — Ce moteur reproduit, sous une forme un peu différente, les dispositions adoptées par Gramme. Le noyau de l'armature (fig. 221) se compose de rondelles de fer doux, taillées dans une feuille de tôle de 2 millimètres d'épaisseur et séparées par des feuilles de papier. Quant à l'armature elle-même, elle comprend un nombre très réduit de spires de fil et se trouve placée aussi près que possible des électro-aimants inducteurs qui l'entourent concentriquement. Cette disposition augmente l'action magnétique de ces derniers ainsi que la puissance du moteur, relativement à son poids et à son volume.

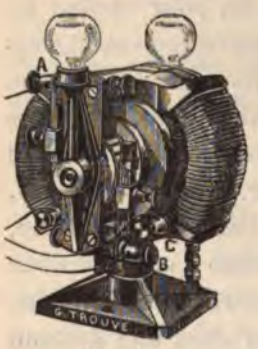


Fig. 221.

Le moteur Trouvé est spécialement appliqué par son inventeur à la propulsion des canots ; il se construit sur deux types de 8 et 18 kilogrammes, qui donnent le premier 38,8 kilogrammètres avec 17 ampères, 50 volts et 2 400 tours ; le second 77,8 kilogrammètres avec 19 ampères, 60 volts et 2 300 tours.

340. Moteur Siemens. — Le moteur Siemens, assez répandu en Allemagne et représenté par la figure 222, est destiné à fournir de

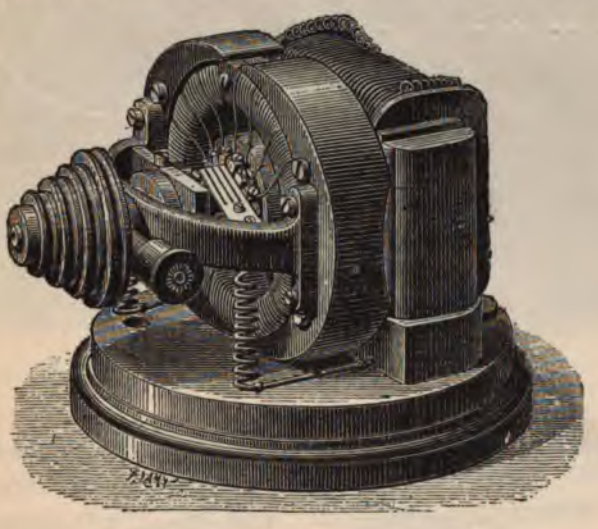


Fig. 222.

faibles forces variant entre 0, 1 et 1 cheval. Il renferme un anneau Gramme et un électro placé latéralement à l'anneau ; l'enroulement varie suivant les applications.

Le moteur de 0, 5 cheval absorbe à 1 800 tours 700 watts. par seconde ; celui de 1 cheval marche à 1 500 tours et exige 1 200 watts.

341. Moteur Reckenzaun. — Le caractère distinctif du moteur Reckenzaun (fig. 223) réside dans le noyau de son armature ; celui-ci se compose d'une sorte de chaîne en fer, formée d'une série de pièces boulonnées les unes sur les autres, et autour desquelles sont enroulées les différentes bobines (fig. 224). Cette

disposition facilite le montage des bobines et permet d'améliorer considérablement la ventilation de l'appareil.

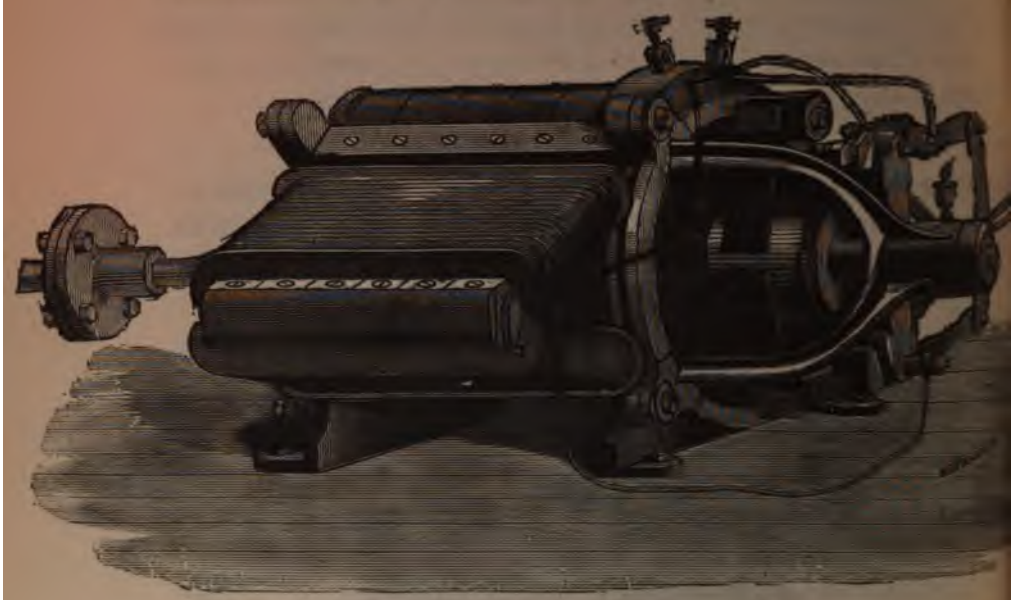


Fig. 223.

Ce moteur est très léger et peut être avantageusement appliqué

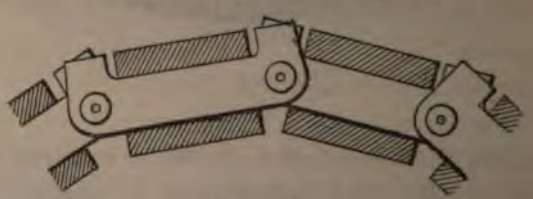


Fig. 224.

à la propulsion des canots et des tramways ; comme poids, on peut compter sur 1 cheval par 27 kilogrammes.

342. Moteur Immisch. — Le moteur Immisch (fig. 225) est fort employé en Angleterre ; il comprend une armature à enroulement Siemens, avec noyau en disques de fer isolés, et deux électros inducteurs.

Le caractère particulier de ce moteur consiste dans la disposi-

tion du collecteur ; celui-ci se compose de deux anneaux isolés, placés à côté l'un de l'autre et partagés chacun en un même nombre de segments (égal à la moitié du nombre de bobines de l'armature) ; les anneaux sont montés sur l'arbre de telle sorte que chaque segment de l'un d'eux se trouve à cheval sur deux segments de l'autre, ainsi que l'indique la figure. Enfin la machine comporte quatre balais, placés aux extrémités d'un même dia-

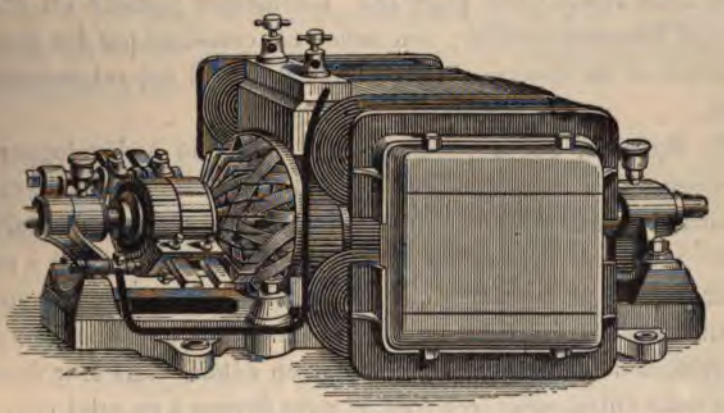


Fig. 225.

mètre ; les balais voisins sont réunis électriquement deux à deux. Les extrémités de chaque bobine de l'armature sont reliées, l'une à un segment d'un des anneaux, l'autre au segment voisin du second anneau. Il résulte de là que chaque paire de balais met une bobine en court circuit au moment de son passage dans la zone neutre. Les autres bobines sont de chaque côté des balais reliées en série.

En d'autres termes, cette disposition produit le même effet que si l'on avait un collecteur du type ordinaire avec une paire de balais le touchant sur une surface assez large pour être à la fois en contact avec deux segments voisins et mettant par suite en court circuit la bobine correspondante.

343. Moteur Daft. — L'armature du moteur Daft en service sur les chemins de fer américains est du genre Gramme. Les noyaux des électros sont en fer forgé ; ils sont enveloppés de tambours en cuivre sur lesquels les bobines sont enroulées ; celles-

ci comprennent trois enroulements différents, l'un en série, les deux autres en dérivation. Cette disposition permet d'assurer la constance de la vitesse qui ne varie pas de plus de 2 p. 100. Les pièces polaires sont en fonte.

344. Moteur Sprague. — Le moteur Sprague se distingue par son mode de régulation différentielle et par la mise en marche dont nous avons parlé page 482. L'armature possède un enroulement Siemens modifié ; son noyau est constitué par des couches alternatives de disques de papier et de fer, et est soigneusement isolé.

M. Sprague, qui a puissamment contribué à développer les applications des moteurs électriques et qui a donné de ceux-ci une théorie très intéressante, a imaginé toute une série de dispositions différentes pour l'enroulement des électros, destinées soit à maintenir la vitesse constante, soit à la faire varier proportionnellement à la charge, soit enfin à éviter le décalage des balais ; nous regrettons de ne pouvoir les exposer en détail, mais leur description nous entraînerait trop loin, et nous devons à ce sujet renvoyer nos lecteurs aux ouvrages spéciaux.

345. Moteur Van Depoele. — C'est encore un des nombreux moteurs employés sur les tramways électriques américains. L'armature, du système Gramme, est complètement entourée par les pièces polaires de l'électro, qui sont à angle droit avec celui-ci.

Le changement de marche s'obtient au moyen de deux leviers qui portent chacun une paire de balais ; ces paires sont destinées, l'une à la marche en avant et l'autre à la marche en arrière.

La régulation du moteur est obtenue par l'addition de bobines de résistance au circuit de l'électro ; cette addition se fait au moyen d'une manivelle que l'employé manœuvre lorsqu'il s'agit de la traction des tramways ; elle opère automatiquement dans les autres applications. A cet effet, les fils de ces bobines aboutissent à une série de ressorts placés au-dessous d'un levier horizontal relié à l'une des bornes du moteur ; ce levier porte à une de ses extrémités un poids qui tend à le faire baisser et à l'amener en contact avec les ressorts ; dans cette position toutes les bobines

additionnelles se trouvent placées en dérivation entre le bout du fil de la bobine principale et la borne. Mais, si le courant devient trop fort, ce qui augmente le champ magnétique, le pôle de l'électro surmonte le poids du levier et attire celui-ci, en supprimant son contact avec un certain nombre de bobines additionnelles (ce nombre varie suivant l'attraction de l'électro). La résistance de l'ensemble des bobines additionnelles augmente, le courant de l'électro et, par suite, le champ magnétique diminuent. L'appareil se règle donc d'après le poids placé sur le levier qui équilibre l'attraction de l'électro.

346. Moteur Thomson-Houston. — Dans le moteur Thomson-Houston, les pièces polaires de l'électro, dont les noyaux sont cylindriques, enveloppent complètement l'armature ; le noyau de cette dernière a une section presque carrée, son enroulement est du système Siemens modifié, et les bobines de l'électro sont en dérivation. La disposition particulière du noyau de l'armature et la faible résistance de ses bobines rendent très minime la perte due aux courants de Foucault et à la résistance intérieure, ce qui évite l'échauffement de la machine.

Les moteurs Thomson-Houston, actuellement construits aux États-Unis, varient de 1 à 15 chevaux ; ils sont destinés à fonctionner sur des circuits à différence de potentiel constante.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA TRANSMISSION DE LA FORCE

347. — Les applications industrielles de la transmission électrique de l'énergie sont excessivement nombreuses et l'on peut dire qu'il n'y a peut-être pas une usine où elle n'ait sa place marquée, soit pour actionner un appareil de levage, une machine-outil, une pompe, un ventilateur, un engin quelconque difficile à commander directement par les transmissions mécaniques ; soit pour utiliser un emplacement qui autrement resterait inoccupé ; soit encore pour transmettre la force à une annexe, trop légèrement construite pour supporter des transmissions mécaniques, ou trop éloignée du moteur de l'usine pour être desservie par des arbres prolongés.

D'un autre côté, elle peut être fort utile toutes les fois qu'il existe dans une ville une station centrale d'électricité à courant continu ; dans ce cas, en effet, l'énergie électrique peut être distribuée aux particuliers aussi bien que la lumière, et servir à la commande de machines-outils, de ventilateurs, d'ascenseurs, de presses d'imprimerie, etc., comme cela se présente déjà très fréquemment aux États-Unis.

Enfin la transmission électrique de la force a encore une autre application dont les développements commencent à être fort importants, nous voulons parler de la traction des tramways ; la navigation et l'aérostation électriques sont aussi fondées sur son emploi. On voit par cette rapide énumération que cette application spéciale de l'électricité paraît appelée à un grand avenir.

L'intervention de l'électricité entraîne, il est vrai, une perte de travail de 35 à 50 p. 100. Mais cette perte ne dépasse guère celle qui résulte de l'emploi des courroies ; car, avec ces dernières, la transmission ne cesse pas de tourner, quelque faible que soit le nombre des machines en service, et consomme inutilement en frottement une certaine quantité d'énergie.

Nous ne décrirons pas tous les différents genres d'installations que l'on peut avoir à faire ; nous allons simplement citer les principaux.

348. Calcul d'une transmission électrique. — Avant d'aborder l'étude des applications, il nous semble utile de résumer la question au point de vue industriel et de montrer dans quelles conditions la transmission de la force par l'électricité est réellement avantageuse. Dans ce but, nous ne pouvons mieux faire que de citer les chiffres publiés par M. Hippolyte Fontaine, dont l'autorité en pareil sujet est reconnue de tous.

Il a pris pour exemple un cas qui se rapproche des conditions ordinaires de la pratique : le transport d'une force de 40 chevaux à une distance de 3 kilomètres.

Génératrice. — Pour la vitesse et la force électromotrice de la machine génératrice, il faut se limiter aux valeurs que l'expérience a indiquées, afin que l'on soit sûr d'avoir un service parfaitement

régulier et surtout de longue durée. Ces valeurs sont de 1 000 tours pour la vitesse de la dynamo et de 1 500 volts pour sa force électromotrice.

Ce point de départ établi, il est facile de calculer toutes les données du problème. La force à transmettre étant de 40 chevaux, c'est-à-dire de 3 000 kilogrammètres, l'intensité du courant est donnée par la formule

$$T = \frac{EI}{g} \text{ d'où } I = \frac{Tg}{E}$$

On a donc :

$$I = \frac{3\,000 \times 9{,}81}{1\,500} = 19{,}62 \text{ ampères,}$$

ou 20 ampères en chiffre rond.

Les dynamos, construites par M. Gramme pour transporter la force avec une force électromotrice de 1 500 volts, ont une résistance intérieure de 10 ohms. Comme le passage d'un courant dans un conducteur correspond à un travail égal à $\frac{RI^2}{g}$, la résistance de la machine génératrice déterminera une perte de $\frac{10 \times \overline{20}^2}{9{,}81}$ ou environ 400 kilogrammètres.

Il résulte en outre d'expériences nombreuses que les pertes de travail dues aux frottements mécaniques et à d'autres causes accessoires s'élèvent dans les bonnes machines à environ 10 p. 100 du travail électrique absorbé ou rendu. La génératrice, absorbant 3 000 kilogrammètres, en perd 300 de ce chef.

La perte totale dans la génératrice est donc de 400 + 300 ou 700 kilogrammètres ; le travail t transmis au circuit sera ainsi de 2 300 kilogrammètres, et la différence de potentiel aux bornes de la génératrice s'obtiendra par la formule

$$e = \frac{tg}{I} = \frac{2\,300 \times 9{,}81}{20} = 1\,128 \text{ volts.}$$

Réceptrice. — Examinons maintenant à quelles conditions doit satisfaire la réceptrice. M. Fontaine conseille l'emploi d'une réceptrice identique à la génératrice. On n'a ainsi besoin que d'une seule machine de rechange en cas de réparation, et l'on évite l'excès

de vitesse que pourrait prendre la réceptrice tournant sans charge.

La réceptrice, ayant une résistance intérieure de 10 ohms, absorbera de ce chef 400 kilogrammètres, auxquels il faut ajouter le travail perdu par suite des frottements. Ce dernier sera moindre que pour la génératrice, puisque le travail et la vitesse sont eux-mêmes moindres ; d'après l'expérience, il est égal aux deux tiers du premier; il sera donc de 200 kilogrammètres dans le cas que nous étudions, de telle sorte que le travail total absorbé sans profit par la réceptrice sera de 600 kilogrammètres.

En résumé, sur les 3 000 kilogrammètres fournis au point de départ, il y en aura 700 + 600 ou 1 300 dépensés en pure perte par les machines électriques. Il en restera donc 1 700, desquels on doit encore déduire ceux qui seront absorbés par le conducteur.

Conducteur. — Les éléments des machines une fois arrêtés, déterminons le diamètre à adopter pour le conducteur. Ce calcul se fait d'après le nombre de kilogrammètres dont on veut disposer, et c'est lui qui indique si l'installation est ou non économique ; il peut en effet conduire à une valeur trop considérable pour ce diamètre, de telle sorte que la construction de la ligne revienne à elle seule plus cher que l'installation d'une machine à vapeur ordinaire.

Pour mieux faire saisir l'importance des frais de construction de la ligne, examinons successivement les trois cas où la force disponible sur l'arbre de couche de l'usine doit être de 18, de 20 et de 22 chevaux. Pour disposer de 18 chevaux, c'est-à-dire de 1 350 kilogrammètres, il faut n'en dépenser que 350 sur la ligne. Ce chiffre donne la résistance que doit avoir la ligne au moyen de la formule

$$T = \frac{R I^2}{g} \text{ d'où } R = \frac{T g}{I^2}$$

$$R = \frac{350 \times 9{,}81}{400} = 8{,}6 \text{ ohms.}$$

Cherchons maintenant quelle section le conducteur de cuivre (seul métal qui puisse être pratiquement employé dans ce genre d'installations) devra avoir pour présenter une résistance de 8,6

ohms. Un ohm correspondant à peu près à un fil de cuivre de 60 mètres de long sur 1 millimètre carré de section, une ligne de 6 000 mètres (3 000 mètres pour le fil d'aller, 3 000 mètres pour celui de retour), construite avec un semblable fil, aurait 100 ohms de résistance. La résistance varie en raison inverse de la section ; donc le fil devra avoir 11,6 millimètres carrés pour que sa résistance soit de 8,6 ohms.

Un pareil fil pèse environ 104 kilogrammes par kilomètre. A 10 francs (prix moyen) par kilogramme, les 6 kilomètres de conducteur coûteront 6 240 francs.

En répétant les mêmes calculs dans les deux hypothèses où l'on veut avoir 20 et 22 chevaux disponibles, on trouve pour le câble les conditions suivantes :

	20 chevaux transmis.	22 chevaux transmis.
Résistance totale	4,9 ohms.	1,2 ohm.
Section.	20 mill. carr.	83,33 mill. carrés.
Poids par kilomètre.	180 kilogr.	750 kilogr.
Prix total.	10 800 francs.	45 000 francs.

Ces chiffres montrent avec quelle rapidité le prix de la ligne augmente lorsqu'on veut avoir un rendement plus élevé. Il n'est donc pas étonnant que, dans certains cas, ce point suffise à lui seul pour faire perdre l'économie pouvant résulter de l'emploi d'une force motrice qui même ne coûte rien.

349. Appareils de levage. — Quelques exemples nous permettront de faire voir les avantages de l'électricité pour la manœuvre des appareils de levage.

Grue de l'usine Marrel. — Dans l'installation faite par MM. Marrel, à Rive-de-Giers, la machine génératrice, du type Gramme, donne 120 volts et 375 ampères ; elle est destinée à fournir non seulement le courant nécessaire à la réceptrice, mais encore à 18 lampes à arc Gramme prenant 12 ampères et montées par deux en tension.

La réceptrice est une machine Gramme prenant 230 ampères et 70 volts, en dérivation.

Le courant est conduit par deux câbles en cuivre nu de 100 mil-

limètres carrés de section ; il est recueilli par deux chariots indépendants, munis chacun de cinq galets à gorge (3 inférieurs et 2 supérieurs) qui roulent sur le câble. Les galets sont réunis à des bornes sur lesquelles sont fixés des fils qui vont au tableau de distribution de la réceptrice ; ce tableau est muni d'un rhéostat de circuit qui permet de faire varier la résistance de façon à obtenir trois vitesses différentes de la réceptrice. Un autre rhéostat est intercalé dans le même circuit et sert à la mise en marche.

La réceptrice commande par une courroie et deux équipages d'engrenages coniques le mouvement de translation du pont et actionne une deuxième poulie qui commande tous les mouvements du chariot portant le treuil.

L'ascension du fardeau peut se faire à trois vitesses, l'une correspondant au poids maximum de 120 tonnes, l'autre à 60 tonnes, et la troisième pour les petits fardeaux.

Grue des magasins généraux de Roubaix. — Cet appareil sert à empiler des balles de laine dans des magasins où, en raison des dangers d'incendie, on ne pouvait introduire de machine à vapeur et où le travail se faisait autrefois à bras. D'après les conditions du problème posé aux constructeurs, la grue devait élever une charge de 500 à 600 kilogrammes à une hauteur de 9 mètres, et la mettre en place dans un rayon de $3^m,20$.

Les deux dynamos sont du système Gramme ; la génératrice demande une force motrice de 6,5 chevaux, et fournit à 1 200 tours un courant de 15 ampères avec une différence de potentiel de 250 volts ; la réceptrice tourne à 900 tours et produit 4 chevaux. Le rendement industriel est de 61 p. 100.

La grue étant susceptible de se déplacer sur toute la longueur du bâtiment, qui occupe un espace de 60 mètres sur 70 et est divisé en un certain nombre de travées, il a fallu combiner une disposition spéciale pour la prise de courant de la réceptrice. A cet effet, le courant de la génératrice est amené au-dessus de chaque travée par deux conducteurs rigides en fer cornière galvanisé ; d'autre part, à la réceptrice aboutissent deux fils qui viennent se fixer à deux bornes réunies électriquement à deux galets de prise de courant, le tout logé dans une monture au-dessus du poteau de la

grue. Une tringle avec contrepoids commandé par un levier au bas de l'appareil permet d'établir ou de supprimer le contact entre les galets et les conducteurs en fer.

Les résultats obtenus dans la manœuvre de l'appareil sont excellents. Autrefois, avec 10 hommes, on mettait de 18 à 20 heures pour former une pile de 150 balles ; le même travail s'exécute actuellement avec 4 hommes en 3 heures. L'économie de temps et d'argent réalisée est donc considérable.

350. Machines-outils électriques. — La transmission électrique de la force peut être avantageusement adoptée pour la commande de toutes les machines-outils, scies, foreuses, perceuses, machines à raboter, etc. Il suffit de monter la réceptrice sur le bâti même de la machine et de disposer les engrenages de manière à obtenir la vitesse dont on a besoin. Dans les usines qui possèdent la lumière électrique, la dynamo employée à ce service peut en même temps fournir le courant à la réceptrice.

Moteur de M. Rowan. — Il est inutile d'entrer dans le détail de ces installations qui nous entraînerait trop loin ; mais, avant de quitter cette question, nous dirons quelques mots des machines spéciales construites par M. Rowan, de Glasgow. Ces machines qui servent à percer et à river les tôles, à mater les joints, etc., présentent cette particularité que le courant électrique est employé non seulement à les mettre en mouvement, mais encore à les fixer, au moyen d'un puissant électro-aimant, à la tôle sur laquelle elles doivent travailler. On peut ainsi déplacer l'appareil avec la plus grande facilité.

Une des difficultés que présente la construction des navires consiste dans le perçage des trous, le rivetage des tôles et le matage des joints que l'on exécute sur cale. Il existe une quantité innombrable de travaux de cette espèce que l'on est forcé de faire sur place à cause de la difficulté qu'il y a à raccorder des pièces de formes très compliquées. On est obligé, par exemple, pour percer les trous, d'employer des perceuses manœuvrées à bras que l'on déplace pour chaque trou. L'outil est adapté avec des boulons, ce qui occasionne une perte de temps considérable,

et sa manœuvre est quelquefois fort difficile à cause de la place gênante qu'il occupe souvent.

L'outil de M. Rowan simplifie beaucoup la question. Le courant produit par une dynamo alimente un fort électro-aimant qui supporte la perceuse. Une fois qu'on a déterminé la place que doit occuper l'outil, on amène le courant dans l'électro-aimant par un commutateur ; l'âme de fer s'aimante et s'attache à la tôle qu'il s'agit de percer. Un second commutateur amène le courant dans le moteur électrique qui commande l'outil.

La vitesse de rotation étant considérable, le travail est exécuté rapidement. En manœuvrant le commutateur, on arrête le courant, et l'électro-aimant n'adhérant plus à la tôle peut être transporté ailleurs.

Cette description suffit pour montrer quelle économie de temps on peut réaliser par ce système, toute l'opération se réduisant à mettre l'appareil en place et à manœuvrer un commutateur. La flexibilité du conducteur permet d'installer l'outil dans toutes les positions ; il peut opérer sur une paroi verticale ou inclinée, l'adhérence étant toujours la même.

Dans les immenses ateliers que possède à la Seyne, près de Toulon, la Compagnie des Forges et Chantiers, on se sert de cet outil avec grand avantage. Pour faciliter la manœuvre, la dynamo génératrice est installée sur un chaland à proximité du navire. La force motrice peut ainsi se déplacer suivant les besoins.

351. Ventilation des édifices. — Parmi les progrès réalisés depuis peu dans la construction des édifices, l'un des plus importants consiste dans l'application de l'électricité à la mise en mouvement des ventilateurs. Il peut paraître étonnant, au premier abord, que l'on ait recours à l'électricité en pareille circonstance ; mais il faut se rendre compte que les ventilateurs doivent être placés dans le voisinage immédiat des pièces auxquelles ils sont destinés et que souvent ces pièces se trouvent fort éloignées les unes des autres. Avec les systèmes ordinaires il faudrait autant de machines motrices que de ventilateurs, ou un système fort compliqué de distribution mécanique : dans les deux cas l'installation serait moins facile et reviendrait à un prix plus élevé qu'avec l'é-

lectricité. Les moteurs électriques, en effet, sont légers, peu volumineux et n'exigent pour ainsi dire pas de fondations ; on peut les placer dans n'importe quel endroit. En outre, la pose des fils conducteurs est excessivement simple et ne demande aucune canalisation intérieure. Le système offre donc de très grands avantages sous le double rapport de la facilité et de l'économie de l'installation.

Installation de l'Hôtel de Ville. — A l'Hôtel de Ville, le courant électrique est produit par deux dynamos Gramme, à double enroulement, qui absorbent chacune environ 4 chevaux. Elles desservent cinq circuits distincts sur lesquels sont placés les différents moteurs, et marchent ensemble ou séparément suivant les besoins du service ; elles peuvent même être dans certains cas substituées l'une à l'autre. Leur vitesse est de 1 250 tours par minute, et chacune d'elles débite 50 ampères avec une différence de potentiel aux bornes de 110 volts.

Les moteurs électriques, qui commandent les ventilateurs, sont aussi du système Gramme. Pour la commodité du service on les a tous pris du même type, mais leur résistance a été déterminée d'après le travail que chacun d'eux doit produire. Ils sont placés près des ventilateurs qu'ils doivent actionner ; certains d'entre eux se trouvent ainsi à 130 et 155 mètres des machines génératrices. Les ventilateurs sont au nombre de 35 ; il y a par suite un nombre égal de réceptrices, toutes placées en dérivation ; leur puissance varie de 7 à 40 kilogrammètres.

Enfin l'installation comporte naturellement une certaine quantité d'instruments de mesures et d'appareils accessoires, tels que voltmètres, ampèremètres, commutateurs, interrupteurs, rhéostats; ces derniers sont destinés à assurer la mise en marche progressive des moteurs, afin d'éviter la chute des courroies qui commandent les ventilateurs. Tous ces appareils sont réunis dans une même pièce et placés sous la surveillance d'un ouvrier, à proximité de la salle des machines.

352. Applications dans les mines. — Nous n'avons pas l'intention d'énumérer toutes les applications que la transmission élec-

trique de la force peut recevoir dans les mines, où le faible volume du moteur électrique, sa légèreté, sa facilité de transport sont des qualités très précieuses. Cette transmission peut être avantageusement employée pour l'élévation des bennes, pour le transport du charbon dans les galeries souterraines, pour la ventilation de ces galeries, pour le perforage des trous de mine, etc. La description de ces différentes installations nous entraînerait beaucoup trop loin et ne contiendrait d'ailleurs aucun fait nouveau. Nous allons en donner simplement quelques exemples, qui permettront d'apprécier les services rendus par l'électricité.

Le premier concerne la traction des wagonnets de mine à la houillère d'Oppel (Saxe). La galerie d'extraction a une longueur de 710 mètres ; il en sort par journée de 16 heures 600 wagonnets, dont chacun contient 475 kilogrammes de houille et pèse en charge 720 kilogrammes environ. Les trains de wagonnets sont remorqués à une vitesse variant de 2,20 à 2,90 mètres par seconde. La machine à vapeur, placée au jour, fait de 225 à 250 tours pendant l'opération, qui dure de trois minutes et demie à quatre minutes et demie pour un parcours utile de 609 mètres. La machine à vapeur développe une puissance de 11,2 chevaux mesurés au frein ; la locomotive électrique rend en même temps 4,18 chevaux, ou, en admettant une perte de 25 p. 100 due au mécanisme, la force transmise à la locomotive est de 5,22 chevaux, soit 46 p. 100 de la puissance initiale.

Au point de vue du prix de revient de cette traction, M. Forster, directeur des houillères royales de Saxe, a établi qu'en adoptant pour l'entretien du matériel et l'amortissement le chiffre de 15 p. 100, la dépense est par wagon remorqué de 3,01 pfennigs (4,69 centimes) avec l'électricité, de 3,71 pfennigs (5,79 centimes) avec des chevaux et de 6,2 pfennigs (9,67 centimes) avec des hommes, pour 660 wagons par jour. Si l'on porte l'extraction à 800 wagons par jour, la dépense est réduite à 2,7 pfennigs (4,21 centimes) avec l'électricité et ne varie pas sensiblement pour les chevaux et les hommes.

Une autre application a été réalisée en France, dans les mines de Blanzy. Dès l'année 1881, deux machines Gramme étaient installées dans ces mines pour actionner un ventilateur au puits Saint-

Claude ; ces dynamos ont fonctionné avec de très bons résultats jusqu'au moment où les travaux du puits furent arrêtés. Elles se trouvèrent alors disponibles, et M. Graillot, ingénieur du puits Sainte-Elisabeth, eut l'idée de les utiliser pour un service de distribution d'eau.

Il s'agissait de puiser de l'eau dans la rivière de la Sorme et de la refouler à une distance de 290 mètres à un niveau supérieur de 20 mètres. La force devait être prise sur la transmission du ventilateur du puits ; les deux machines Gramme étaient éloignées de 775 mètres, et la réceptrice actionnait directement une pompe centrifuge de Dumont.

Les deux câbles formant la transmission électrique ont été simplement soutenus par des poteaux télégraphiques et fixés par des chapeaux en bois. Le câble d'aller est composé de 7 fils en cuivre, de 1,1 millimètre de diamètre, enveloppés de toile goudronnée et de caoutchouc. Le câble de retour consiste en trois torons de 4 fils de fer n° 12, diamètre 1,8 millimètre, donnant ensemble une section de 30 millimètres carrés environ ; il n'est pas enveloppé et, sur les poteaux, l'isolement est obtenu au moyen d'un manchon en caoutchouc serré par le chapeau en bois. Cette disposition primitive n'est assurément pas recommandable ; mais elle est économique et, dans les circonstances de l'exploitation, peut être considérée comme suffisante. Depuis plusieurs années que la pompe fonctionne, les câbles n'offrent pas de trace de détérioration.

Le ventilateur tourne à la vitesse de 50 tours par minute ; pour donner au départ à la machine Gramme son allure normale, on a monté une double transmission, la première correspondant à 200 tours et la seconde à 800 tours par minute, ce qui permet de faire marcher la génératrice à 1 600 tours. La machine réceptrice Gramme marche à 1 200 tours et entraîne la pompe qui fournit par seconde 1 litre et demi d'eau ou 5 400 litres par heure. Cette eau est employée à la ferme des Étiveaux pour les besoins des habitants et du bétail, et au puits Saint-Louis pour l'alimentation des chaudières.

Il est impossible d'indiquer exactement quel peut être le rendement des machines électriques, faute de savoir la quantité de force prise sur l'arbre du ventilateur ; d'ailleurs dans l'installation de

Blanzy comme dans beaucoup d'autres cas analogues où la force ne coûte rien, la question a peu d'importance.

353. — Parmi les installations plus récemment exécutées, nous pouvons citer les deux suivantes :

1° Dans la mine de Trafalgar, située dans la forêt de Dean, l'électricité sert à actionner la pompe d'épuisement. Celle-ci, à double action, a un piston plongeur de 225 millimètres de diamètre et 250 millimètres de course ; elle fait 25 tours par minute, tandis que le moteur qui la commande a une vitesse de 650 tours. Ce moteur, du système Elwell Parker, développe environ 17,5 chevaux.

La pompe et le moteur sont installés sous terre ; le courant électrique est amené par un câble en cuivre de 1 800 mètres de longueur, recouvert d'une enveloppe isolante, protégé par des caisses en bois dans le puits même, et supporté dans les galeries souterraines par des isolateurs en porcelaine espacés de 9 mètres. Le conducteur de retour est un vieux câble en fer, accroché au guidage et aux poteaux.

La génératrice, du système Elwell Parker, est établie au jour près de l'entrée du puits et donne, à la vitesse de 950 tours, environ 23 chevaux ; elle est actionnée par une machine à vapeur de 30 chevaux.

Les relevés exécutés sur la machine à vapeur, sur la génératrice et sur la réceptrice, se résument ainsi :

Puissance indiquée de la machine à vapeur	29,49	chevaux.
Vitesse de la réceptrice.	900	tours.
Différence de potentiel aux bornes de la génératrice	320	volts.
Intensité du courant.	43	ampères.
Vitesse de la réceptrice	650	tours.
Différence de potentiel aux bornes de la réceptrice.	260	volts.
Rendement en eau élevée	10,36	chevaux.

Le rendement total de la transmission est de 35 p. 100 en eau élevée ; celui de la transmission électrique, pris de l'arbre de la génératrice à l'arbre de la réceptrice, est de 60 p. 100.

Pendant l'automne de 1887, la pompe a eu à en

d'eau par minute. Les frais sont estimés à environ 15 centimes par mètre cube, et l'économie réalisée à 12000 fr. par an.

2° Il existe dans les mines de sel de New-Stassfurt, en Allemagne, une intéressante application de l'électricité, qui donne d'excellents résultats depuis le commencement de 1885 ; elle concerne une machine à molette pour l'extraction des sels de potasse.

La dynamo génératrice est actionnée par une machine à vapeur et se trouve en dehors de la mine, à une distance d'environ 155 mètres du puits ; celui-ci a une profondeur de 360 mètres et la réceptrice est située à environ 40 mètres de son extrémité inférieure ; la distance entre les deux dynamos est donc de 555 mètres. Les conducteurs, en cuivre, sont nus à l'air libre ; à l'intérieur du puits et dans la mine, ils sont isolés et protégés par une couverture en bois.

Le plan incliné, à deux voies, a une inclinaison de 40°. Le trafic dure huit heures et comporte 100 wagonnets pesant chacun 1 200 kilogrammes avec la charge, et 430 kilogrammes à vide ; le trajet dure trois minutes, ce qui correspond à une vitesse de $0^m,864$ par seconde et exige sur la machine à vapeur une puissance de 15 chevaux.

La dynamo génératrice donne 22 ampères et 370 volts ; la réceptrice marche à la vitesse de 1 000 tours et utilise environ les trois quarts du travail électrique produit. Le rendement de la partie électrique de l'installation, mesuré entre les arbres des deux dynamos, est d'environ 53 p. 100.

Les dynamos sont du système Siemens et à enroulement compound.

354. Distribution de la force par les stations centrales. — Les exemples que nous venons de citer concernent tous des installations isolées dans lesquelles les génératrices sont établies en vue d'un travail bien déterminé. Mais, ainsi que nous l'avons dit plus haut, les stations centrales d'électricité peuvent fournir la force motrice tout aussi bien que la lumière ; la distribution de l'énergie devient dans ce cas très pratique, car l'abonné n'a qu'à fermer le circuit de son moteur électrique pour mettre immédiatement en marche la machine à laquelle ce moteur est attelé.

Ce genre d'applications a progressé très rapidement aux États-Unis ; il favorise d'ailleurs le développement des stations centrales elles-mêmes en permettant d'utiliser pendant la journée le matériel de l'usine et d'augmenter ainsi les recettes de l'exploitation. Les moteurs électriques, installés de cette manière sur les réseaux d'éclairage, servent aux emplois les plus variés ; des ateliers entiers se procurent ainsi la force motrice qui leur est nécessaire ; ailleurs ce sont des journaux qui sont tirés sur des presses mues par l'électricité ; les cordonniers, les imprimeurs, les relieurs, les menuisiers, les blanchisseurs, les confiseurs, les dentistes, les gantiers, etc., figurent dans la liste des abonnés, sans compter une foule d'installations particulières, pour laver les bouteilles, pomper de l'eau, ventiler les appartements, actionner les ascenseurs, etc. En un mot, le moteur électrique est applicable partout où l'on a besoin de force motrice, en si faible quantité que ce soit.

Les distributions directes, comme nous l'avons vu, se divisent en deux groupes principaux, suivant que l'intensité ou la différence de potentiel aux bornes de la source reste constante ; nous allons rapidement indiquer les conséquences qui résultent de l'adoption de l'un ou l'autre de ces deux procédés pour l'alimentation des moteurs.

Avec le système à intensité constante, l'intensité varie, suivant les installations, de 6 à 10 ampères ; quant à la différence de potentiel aux bornes, elle ne dépasse presque jamais 2 500 volts. L'énergie disponible est donc au maximum de 10×2500 watts. Or, un moteur développant une puissance de 1 cheval, absorbe environ 920 watts, si l'on tient compte de son rendement qui est de 80 p. 100. Le réseau ne pourra donc produire que $\frac{10 \times 2500}{920} = 27$ chevaux. Sa puissance se trouve ainsi très limitée, et il ne peut être véritablement utilisé à la distribution de l'énergie que si l'on veut se contenter de transmettre des forces très faibles, variant entre 0,1 et 1 cheval, par exemple.

Il n'en est plus du tout de même avec le système à différence de potentiel constante ; car, l'intensité n'ayant pour ainsi dire pas de limites, et la différence de potentiel aux bornes de la source pouvant s'élever jusqu'à 200, 300 et même 1

l'emploi du système à trois, quatre et cinq fils, la quantité d'énergie distribuée sur le réseau est beaucoup plus considérable que dans le cas précédent. A Boston, par exemple, où la distribution se fait à une différence de potentiel constante de 200 volts, on a pu transmettre sans aucune difficulté jusqu'à 200 chevaux, ce qui correspond déjà à un nombre assez grand de moteurs électriques.

355. Chemins de fer électriques. — Parmi les applications que l'avenir réserve à la transmission électrique de la force, l'une des plus importantes est certainement celle de la traction des voitures, principalement dans les grandes villes, où la fumée des moteurs à vapeur rend l'emploi de ces derniers impossible.

Les chemins de fer électriques, déjà très nombreux aux États-Unis, sont encore peu répandus en Europe ; il en existe cependant un certain nombre qui fonctionnent d'une manière assez régulière, et sont avantageux partout où l'on dispose d'une force motrice naturelle et où la longueur du trajet ne dépasse pas quelques kilomètres.

Deux systèmes principaux peuvent être employés dans ce cas : l'un consiste à produire, en un point quelconque du parcours, un courant avec une dynamo génératrice fixe, et à envoyer ce courant dans un moteur électrique placé sur une voiture. La bobine du moteur se met à tourner et communique par des engrenages son mouvement de rotation aux roues de la voiture. La seule difficulté consiste à transmettre le courant à la machine réceptrice, à mesure que la voiture se déplace et s'éloigne du poste générateur.

L'autre système est fondé sur l'emploi des accumulateurs ; ceux-ci sont chargés à l'usine, puis placés sur la voiture, et ils fournissent directement le courant au moteur électrique. Nous allons examiner successivement ces deux solutions. La première comprend plusieurs procédés différents, indiqués par M. Reckenzaun à la Société des Arts de Londres.

1° Les rails servent de conducteurs au courant ; les essieux du véhicule sont isolés des roues, et la communication est établie

avec le moteur électrique au moyen de balais qui frottent, ou de galets qui roulent sur les rails. Ce système, dû à MM. Siemens et Halske, a été le premier proposé pour la traction électrique; l'essai en a été fait à l'exposition industrielle de Berlin de 1879. Exemples : les chemins de fer de Litchterfeld et de Brighton.

Le chemin de Litchterfeld fonctionne depuis le 12 mai 1881 entre la station de Lichterfeld et l'Ecole centrale militaire à Berlin. Les rails sont posés le long de la grande route ou à travers champs, sur des traverses en bois; aucune précaution particulière n'a été prise pour leur isolement. A la traversée des routes, ils sont mis hors de circuit et le courant passe par des conducteurs souterrains. La ligne a une longueur de 2 400 mètres.

L'usine est placée près de la voie, à environ 800 mètres de la station de Lichterfeld; elle comprend deux machines à vapeur de 6 chevaux et deux dynamos Siemens; le courant a 100 volts. En temps ordinaire il suffit d'une machine; pour les jours de fête seulement on utilise les deux, et l'on met deux voitures en service.

La voiture fait 24 voyages par jour. Elle porte 24 voyageurs et pèse 3 200 kilogrammes à vide, y compris le moteur et les organes de la transmission. La vitesse moyenne est de 19 kilomètres à l'heure; le parcours dure environ huit minutes. Le prix est de 0 fr. 25. Le nombre des voyageurs est de 100 000 par an.

2° Le courant circule dans des conducteurs aériens, placés le long de la voie sur des poteaux et formés soit d'un tube creux fendu suivant sa longueur, soit de barres métalliques. Un système de piston dans le cas des tubes, ou un chariot à galets dans le cas des barres, relié au moteur par un câble flexible, sert à la prise du courant. Exemples : chemin de fer de Mœdling, près Vienne, et de Francfort-sur-le-Mein, installés suivant le système Siemens qui a été expérimenté pour la première fois à l'Exposition d'Electricité de Paris en 1881.

Dans le chemin de fer de Francfort-sur-le-Mein, établi en avril 1884, le chariot de contact porte deux pistons pleins en fer, sans ressorts intérieurs; ils doivent être renouvelés tous les mois.

La ligne, d'une longueur totale de 6 560 mètres, est à double voie et va de Ræmerbrucke, dans Francfort, à la ville d'Offenbach.

Toutes les vingt minutes, de 6 heures du matin à 11 heures du soir, partent soit des voitures isolées, soit des trains de deux voitures, l'une avec moteur électrique et l'autre ordinaire. Il y a en tout 14 voitures, dont 10 à moteur. Ces dernières pèsent à vide 4 000 kilogrammes, les autres 2 500 kilogrammes, et toutes peuvent recevoir 24 personnes. La vitesse moyenne est de 12 kilomètres à l'heure, et la durée du parcours de quarante minutes, y compris arrêts à 8 stations.

L'usine est située à mi-chemin, dans le village d'Oberrad ; elle renferme 2 machines à vapeur horizontales de 120 chevaux chacune, et 4 dynamos Siemens, donnant une différence de potentiel aux bornes de 300 volts.

En 1886, ce chemin de fer a transporté 990 328 voyageurs, et le nombre de kilomètres-voiture s'est élevé à 467 630. Le kilomètre-voiture revient à 0 fr. 24, ainsi répartis : salaires et appointements, 0 fr. 139 ; — combustible, 0 fr. 041 ; — huile, chiffons, etc. 0 fr. 009 ; — réparations du matériel et de la voie, 0 fr. 051.

Ce système est aussi employé aux Etats-Unis par M. Van Depoële.

3° Un troisième rail placé dans l'axe de la voie et isolé du sol amène le courant au moteur ; le retour se fait par les rails ordinaires.

La ligne de Portrush, construite par MM. Siemens dans le nord de l'Irlande et inaugurée au mois de septembre 1883, relie la gare de Portrush à Bushmills, sur une longueur de 9 600 mètres, et a même été prolongée jusqu'à la Chaussée-du-Géant.

La force motrice est fournie par 2 turbines de 50 chevaux, établies sur la rivière Bush à 1 450 mètres de la ligne. La force électromotrice du courant est de 250 volts. Les dépenses d'exploitation s'élèvent à 0 fr. 187 par kilomètre-voiture.

Le courant électrique est amené par un rail central, en fer à T, isolé et porté par des poteaux en bois à 43 centimètres au-dessus du sol ; la communication entre ce rail et le moteur Siemens placé sous le plancher de la voiture, est effectuée par deux ressorts en acier qui sont reliés au moteur et frottent sur le rail. Le courant revient à la génératrice par les roues et les rails ordinaires, soigneusement isolés du sol.

Plusieurs systèmes américains rentrent aussi dans cette catégorie, ceux de Sprague, de Daft et de Field, par exemple.

Dans le procédé Sprague, les rails ordinaires communiquent avec la terre ; le rail central, isolé et placé à environ $0^m,10$ au-dessus du sol, n'est pas continu ; il se trouve coupé aux croisements et aiguilles et est en outre divisé en sections de 160 à 180 mètres. A côté de lui et sur toute la longueur de la ligne est un gros conducteur isolé qui amène le courant de la génératrice, et auquel sont reliées les extrémités de chaque section du rail central. Le courant suit ce conducteur, pénètre dans la section du rail central sur laquelle il y a une voiture, est pris par deux roues de bronze reliées au moteur, traverse celui-ci et enfin revient à la génératrice par les rails ordinaires. L'un des avantages de ce système est que, s'il y a un contact ou un accident sur la ligne, on peut supprimer la section endommagée sans affecter en rien le reste de la voie ; le circuit entier reste intact à l'exception des 150 ou 180 mètres où l'accident a eu lieu.

A part le réglage automatique des balais du moteur, dont nous avons parlé § 334, le système Field ne présente aucune particularité très importante : cependant il faut noter la disposition de la roue qui prend le courant sur le troisième rail. Cette roue, dont le plan est, en temps normal, parallèle à la direction du rail, peut être déplacée autour de son axe vertical de manière à devenir perpendiculaire au rail. Dans le premier cas, il y a simplement roulement; dans le second, la roue agit par frottement et, tout en amenant le courant au moteur, brosse en même temps le rail qu'elle maintient dans un état constant de propreté.

Enfin, dans le système Daft, le rail central est en acier et posé sur des tasseaux de bois dur saturé d'asphalte ; sa continuité est assurée par de petits éclissages en cuivre. Le contact sur ce rail est obtenu au moyen d'un galet en bronze phosphoreux relié au moteur. Ce dernier est en général placé sur un truc spécial.

4° Les conducteurs sont placés dans le sol, à l'intérieur d'un tuyau ; une fente longitudinale permet le libre passage du chariot de contact qui amène le courant au moteur.

Le chemin de fer de Blackpool a été construit sur ce système

par M. Holroyd Smith. La longueur totale de la ligne est de 3 200 mètres ; le matériel roulant se compose de 10 voitures de dimensions variables, la plus grande pouvant contenir 56 personnes et la plus petite 30.

L'usine, placée à peu près au milieu de la ligne, renferme 2 machines à vapeur de 25 chevaux chacune, qui actionnent 4 dynamos Elwell-Parker montées en dérivation; la force électromotrice du courant est en général de 220 volts.

Le conducteur central se compose de deux tubes elliptiques en cuivre, sur lesquels frotte le collecteur mobile attaché à la voiture; ces tubes sont portés par des tenons en fer fixés à des isolateurs en porcelaine, qui sont attachés eux-mêmes à des blocs de bois créosoté placés des deux côtés. Les pertes par défaut d'isolement sont à craindre avec une pareille disposition; M. Smith les estime à 7,2 chevaux. D'après lui, les dépenses d'exploitation ne dépasseraient pas 0 fr. 25 par kilomètre-voiture.

Les systèmes Bentley, Knigt et Short-Nesmith, appliqués aux États-Unis, font aussi partie de cette classe.

5° Les conducteurs se composent d'un câble isolé placé le long de la voie, et le courant est amené au moteur par des sections de rails de contact au moment où elles sont occupées par la voiture.

Dans cette classe rentrent le système de MM. Ayrton et Perry, et celui de MM. Pollak et Biswanger qui n'ont encore donné lieu à aucune application. Ils ont été inspirés par le désir d'éviter les pertes de courant dues à un isolement incomplet ou défectueux, mais ils comprennent des organes trop délicats et risquent fort d'être mis hors d'usage par la circulation des autres voitures.

6° Des accumulateurs électriques sont installés sur la voiture et fournissent le courant au moteur suivant les besoins.

Cette méthode, employée par M. Reckenzaun et par M. Julien, est à première vue la solution la plus séduisante du problème de la traction électrique, car elle permet de supprimer tout conducteur aérien ou souterrain. La voiture devient indépendante, à la condition toutefois que l'on reste assez près de l'usine pour que la provision d'électricité emmagasinée soit toujours suffisante.

Ce système a cependant certains inconvénients qui, dans bien des cas, peuvent l'emporter sur les avantages. Les accumulateurs augmentent le poids mort de la voiture et ne permettent par suite que des parcours limités ; leur chargement à l'usine est une opération longue qui entraîne l'emploi d'un matériel considérable ; enfin, l'expérience n'a pas encore fourni des résultats concluants sur la praticabilité du procédé, et l'on ne possède que des données fort incomplètes sur la durée des éléments, sur les frais de réparation, entretien et renouvellements auxquels ils donnent lieu.

L'une des premières installations exécutées sur ce système est celle de Bruxelles. Les voitures électriques, munies d'accumulateurs Julien, font le service de la place Royale à l'extrémité de la rue Belliard, et de l'impasse du Parc au Rond-Point. Elles peuvent fournir jusqu'à 25 voyages par jour, ce qui porte la distance parcourue par chacune d'elles à 90 kilomètres environ.

Chaque voiture peut contenir 32 voyageurs; elle porte sous les banquettes une batterie de 108 accumulateurs de 15 kilogrammes, pesant 8 tonnes ainsi réparties : voiture, 3 350 kilogrammes; moteur électrique et organes de transmission, 650 kilogrammes; accumulateurs et tiroirs, 1 750 kilogrammes; voyageurs, 2 250 kilogrammes.

Chaque batterie est divisée en 4 séries de 27 éléments, placés dans des boîtes en ébonite à trois compartiments disposées dans un tiroir mobile à contacts automatiques. Son poids se décompose comme suit : plaques, 1 335 kilogrammes; récipients et liquides, 300 kilogrammes; tiroirs, 115 kilogrammes.

On compte deux batteries par voiture, l'une en service, l'autre en chargement à l'usine. Cette dernière comprend 2 chaudières multitubulaires, 2 machines à vapeur de 60 chevaux et 4 dynamos pouvant donner chacune de 200 à 500 volts avec une intensité moyenne de 30 ampères, et charger à la fois 4 batteries ; la charge dure huit heures.

Pour effectuer le renouvellement des batteries épuisées, on fait usage de quais ou tables de chargement qui sont disposés de manière à rendre cette manœuvre aussi commode que possible. Chaque véhicule est amené, panneaux ouverts, vis-à-vis d'une table libre sur laquelle on fait glisser les tiroirs contenant les accu-

mulateurs. Puis il est conduit vers une autre table portant les éléments chargés que l'on doit introduire dans la voiture. Les tables sont pourvues de guides avec contacts automatiques, sur lesquels s'appuient les bornes des caisses mises en place pour le chargement ; les contacts sont reliés par des conducteurs au circuit général des dynamos génératrices. De cette manière, le renouvellement des batteries ne demande que quelques minutes, et l'on évite les bris d'appareils qui résulteraient nécessairement d'une manipulation journalière.

En résumé, les systèmes de traction électrique sont nombreux et, quoique l'on compte déjà beaucoup d'applications de ce genre, celles-ci sont encore trop récentes pour qu'on ait pu déterminer leurs avantages et leurs défauts respectifs, et comparer d'une façon exacte le prix de revient de ces systèmes à celui de la traction par chevaux. Les expériences qui se poursuivent un peu partout fourniront à ce sujet d'utiles renseignements.

Quoi qu'il en soit et malgré les résultats déjà obtenus, on ne peut s'empêcher d'observer que le problème devient fort délicat lorsqu'on prétend remplacer d'une manière générale la cavalerie des tramways et omnibus par la traction électrique. Il ne s'agit plus, en effet, dans ce cas, de faire circuler une ou deux voitures, comme sur les lignes que nous avons citées plus haut ; il faut, au contraire, assurer la marche régulière et normale de plusieurs centaines de véhicules pendant toute la journée, et la multiplicité des détails du service complique considérablement la chose. Il n'est pas douteux cependant qu'avec le temps et l'expérience on n'arrive à une solution générale satisfaisante du problème.

356. Puissance de traction. — Avant de quitter cette question, nous croyons utile d'indiquer la puissance de traction nécessaire pour la mise en mouvement d'un véhicule ; les renseignements que nous donnons ci-dessous sont empruntés à un article de M. Hospitalier publié dans l'*Electricien*.

La puissance de traction est fonction de l'effort de traction et de la vitesse du véhicule.

L'effort de traction est l'effort horizontal nécessaire pour main-

tenir un véhicule en mouvement à une vitesse uniforme ; il est, dans les limites pratiques, sensiblement indépendant de cette vitesse. On a donc :

$$P = k F v.$$

P étant la puissance de traction, F le poids du véhicule, v la vitesse et k le coefficient de traction, c'est-à-dire le rapport de la force horizontale nécessaire pour tirer un véhicule au poids de ce véhicule.

La détermination du coefficient de traction a été l'objet de nombreuses expériences de la part du général Morin : il varie considérablement avec la nature de la route, son état d'entretien ou d'humidité. Pour les tramways, il est d'environ 1 p. 100 sur une voie propre et de 2 p. 100 sur une voie sale. Sur les chemins de fer, il s'abaisse à 0,5 p. 100 sur une voie bien entretenue. Dans le cas de la traction des tramways électriques, on peut supposer que le coefficient varie de 1 à 3 p. 100 ; ce chiffre se rapporte à une voie en palier. Quand il y a une rampe, on en tient compte de la manière suivante :

Supposons, pour fixer les idées, un véhicule dont le poids total F est de 1000 kilogrammes, et cherchons la puissance nécessaire pour faire mouvoir ce véhicule à une vitesse de 3 mètres par seconde sur une rampe de 1 centimètre par mètre et sur un terrain dont le coefficient de traction est de 3 p. 100. Cette puissance se composera de deux termes :

1° Puissance nécessaire pour vaincre la résistance du terrain, égale au produit de l'effort de traction k F par la vitesse v :

$$P' = k F v = 0{,}03 \times 1\,000 \times 3 = 90 \text{ kgm.}$$

2° Puissance nécessaire pour élever le véhicule d'une hauteur de 3 centimètres par seconde sur une rampe de 1 p. 100 :

$$P'' = 1\,000 \times 0{,}03 = 30 \text{ kgm.}$$

La puissance totale sera alors :

$$P = P' + P'' = 120 \text{ kgm.}$$

Le moteur devra donc développer 120 kilogrammètres par seconde.

357. Bateaux électriques. — Le principe de la réversibilité des dynamos un fois connu, la navigation électrique s'en déduit facilement. Il suffit de placer sur l'embarcation un moteur électrique dans lequel on envoie un courant, et le moteur communique à l'hélice son mouvement de rotation. Quant au courant, il peut être produit soit par des piles, soit par des accumulateurs.

Le canot de M. Trouvé, que l'on a pu voir à Paris à l'Exposition d'électricité de 1881, portait un moteur de son système qui mettait en mouvement une hélice, par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin. Le moteur était alimenté par deux piles à bichromate, pesant en tout 24 kilogrammes et pouvant être employées ensemble ou séparément. L'embarcation pesait 88 kilogrammes ; elle avait $5^m,50$ de long sur $1^m,20$ de large et contenait trois personnes.

Ce bateau fut expérimenté sur la Seine en mai 1881 ; il remontait le fleuve avec une vitesse de $1^m,50$ par seconde, soit 5 400 mètres par heure. En le descendant, il atteignait une vitesse de $2^m,50$ par seconde, soit 9 000 mètres par heure.

Mais, lorsqu'on emploie ainsi les piles primaires pour produire le courant électrique, les frais sont considérables ; en outre de cette question de dépense, on a l'ennui du rechargement des éléments, de la préparation des zincs, etc.

On a aussi essayé de se servir d'accumulateurs pour la navigation.

Les premières expériences de cette espèce ont été faites sur la Tamise en 1882. L'embarcation, appelée *Electricity*, toute en fer, avait $7^m,62$ de long sur $1^m,52$ de large ; son tirant d'eau était de $0^m,52$ à l'avant et de $0^m,75$ à l'arrière ; elle pouvait contenir douze personnes.

45 accumulateurs Faure-Volckmar, pesant 816,5 kilogrammes, alimentaient l'appareil moteur composé de deux machines Siemens qui actionnaient l'hélice au moyen d'une transmission à courroie. Un commutateur permettait de diminuer à volonté le nombre d'éléments en action ; quant à la marche en avant ou en arrière, elle s'obtenait par le changement de calage des balais, ou plutôt par l'emploi alternatif de deux paires de balais correspondant

chacune à un sens du mouvement. Dans les expériences faites sur la Tamise, quatre personnes seulement avaient pris place sur le bateau. La vitesse obtenue avait été de 14 480 mètres à l'heure pendant la descente et de 12 875 mètres pendant la montée.

En résumé, les bateaux électriques offrent l'avantage de ne pas nécessiter de combustibles et de ne produire ni fumée, ni bruit, ni odeur; en outre, l'appareil moteur étant peu encombrant, ils peuvent être disposés pour contenir un assez grand nombre de passagers. Par contre, ils dépensent beaucoup plus que les canots à vapeur, et cela n'est pas étonnant puisque, comme nous l'avons vu précédemment, les accumulateurs actuels sont des appareils fort peu économiques. En outre, ils ne peuvent convenir pour une longue traversée à cause du poids qu'ils comportent. L'emploi de l'électricité paraît donc réservé jusqu'à nouvel ordre aux bateaux de plaisance et à quelques applications spéciales de la marine militaire comme les torpilleurs et les bateaux sous-marins.

TRANSPORT DE LA FORCE A GRANDE DISTANCE

Pour terminer notre étude, il nous reste à examiner le transport de la force à grande distance ; c'est ce que nous allons faire maintenant en parlant des différentes expériences entreprises dans ce but.

358. Expériences de M. Marcel Deprez. — A la fin de 1882 commencèrent les expériences de M. Marcel Deprez qui ne se terminèrent qu'en 1886. Nous en parlerons très brièvement, sauf pour la dernière, qui seule a fourni des résultats pouvant intéresser l'industrie.

Expériences de Miesbach-Munich. — Les premières expériences furent faites en septembre 1882 entre l'Exposition d'électricité de Munich et une usine de Miesbach. Les deux dynamos, placées à 57 kilomètres l'une de l'autre, étaient reliées par deux fils de fer de $4^{mm},5$ de diamètre présentant une résistance totale de 950,2

ohms. La génératrice, située à Miesbach, était mue par une machine à vapeur ; la réceptrice, dans le palais de l'Exposition, actionnait, comme dans l'expérience de Vienne, une pompe centrifuge qui alimentait une cascade d'environ $2^{m},5$ de hauteur.

Les dynamos faisaient 1 611 tours à Miesbach et 752 tours à Munich. Avec des différences de potentiel de 1 343 volts pour la première et de 850 pour la seconde, et une intensité de 0,519 ampère, on recueillit dans la réceptrice un travail électrique de 0,433 cheval. Le rendement électrique de la transmission était calculé à 38,9 p. 100, et le rendement mécanique estimé à 30 p. 100.

Expériences du chemin de fer du Nord. — Les expériences suivantes eurent lieu en février 1883. Les deux machines électriques, placées l'une à côté de l'autre dans les ateliers de la Compagnie du chemin de fer du Nord à La Chapelle, étaient réunies d'un côté par un fil métallique très court et sans résistance, de l'autre, par deux fils télégraphiques ordinaires allant au Bourget et revenant au point de départ. La longueur totale du circuit était ainsi de 17 000 mètres, et sa résistance de 160 ohms, non compris les résistances des dynamos.

Les résultats les plus favorables furent obtenus avec une intensité de 2,5 ampères et des différences de potentiel de 2 338 volts pour la génératrice et de 1 994 volts pour la réceptrice. Dans ces conditions, on put transmettre 4 ch. 439 avec un rendement mécanique de 36,2 p. 100.

Toutefois il est bon de faire remarquer que l'installation des deux machines électriques côte à côte était loin de présenter les conditions de la pratique, et avait pour conséquence d'améliorer les résultats. En effet, dans cette disposition, l'isolement plus ou moins complet de la ligne n'influe pas sur l'égalité toujours parfaite entre le courant qui passe par la génératrice et celui qui traverse la réceptrice ; les dérivations diminuent la résistance de la ligne et augmentent le travail produit. Au contraire, lorsque les dynamos sont respectivement aux deux extrémités de la ligne, comme cela a lieu dans la réalité, les dérivations diminuent l'intensité du courant qui traverse la réceptrice, et, par suite, le travail produit et le rendement.

Expériences de Vizille-Grenoble. — Les expériences de Vizille-Grenoble, exécutées en août et septembre 1883, donnèrent des résultats un peu plus satisfaisants.

La réceptrice fut placée dans la halle de Grenoble, et la génératrice dans l'usine de ciment de MM. Damaye et Cie, près de la gare de Vizille, où elle était actionnée par la turbine de l'atelier. Les deux machines se trouvaient ainsi à une distance de 14 kilomètres ; elles étaient réunies par une double ligne métallique en bronze silicieux de 2 millimètres de diamètre, présentant une résistance totale de 167 ohms.

On arriva ainsi à transmettre près de 7 chevaux, avec un rendement mécanique de 62,3 p. 100. Pour donner ce résultat, les vitesses de la génératrice et de la réceptrice étaient de 1 140 et 875 tours ; leurs forces électromotrices de 3 146 et 2 231 volts ; l'intensité du courant était à Vizille de 2, 88 ampères et à Grenoble de 2,82 ampères.

Dans ces expériences, des mesures furent spécialement faites pour déterminer les valeurs des dérivations sur la ligne ; on trouva ainsi que, pour une force électromotrice de 3128 volts et une intensité de 3,51 ampères à Vizille, la perte d'intensité s'élevait à Grenoble à 6,6 p. 100. Elle n'était donc pas négligeable, surtout si l'on réfléchit à la valeur assez faible de l'intensité. Comme nous l'avons dit plus haut, il n'est plus exact dans ces applications pratiques de dire que le rendement électrique est égal au rapport des forces électromotrices des machines ; il faut prendre le rapport des produits de ces forces électromotrices par les intensités.

Expériences de Creil. — Les dernières expériences de M. Deprez ont été faites de novembre 1885 à mai 1886, entre la gare de La Chapelle à Paris et Creil. Elles étaient destinées non seulement à mettre en évidence la possibilité technique du transport sans danger d'une grande force à une grande distance, mais encore à déterminer au point de vue pratique les autres données du problème.

Pour faire ces expériences d'une manière probante, on avait cru devoir leur fixer les conditions suivantes :

Au départ, établir à Creil à 50,3 kilomètres de la gare de La

Chapelle deux locomobiles d'une force de 100 à 150 chevaux chacune, leur faire commander à l'aide de courroies un arbre pris pour origine de toutes les mesures et choisi comme arbre moteur ; donner à cet arbre des vitesses pouvant varier entre 50 et 150 tours par minute, c'est-à-dire égales aux vitesses ordinaires des roues et des turbines hydrauliques ; et commander par cet arbre moteur la machine génératrice électrique dont la vitesse de rotation était fixée par M. Deprez à 200 ou 300 tours par minute.

A l'arrivée, placer trois réceptrices électriques à La Chapelle et leur faire actionner :

1° Les machines de l'éclairage électrique, qui fonctionnaient de dix à quatorze heures par jour et consommaient d'une manière régulière de 15 à 20 chevaux ;

2° Les pompes de la manutention hydraulique, qui fonctionnaient jusqu'à vingt heures par jour et consommaient de 35 à 40 chevaux avec des variations assez grandes de l'effet utile ;

3° Une partie des machines-outils des ateliers de La Chapelle, qui fonctionnaient huit à dix heures par jour, pouvaient consommer 12 à 15 chevaux et étaient soumises à des variations très grandes et très brusques de l'effet utile.

En ajoutant que l'expérience devait être prolongée pendant plusieurs mois, nous aurons énuméré les conditions du programme qui, comme on le voit, résumait toutes les exigences de la pratique industrielle.

Mais ces conditions furent loin d'être réalisées. Des raisons d'ordre administratif obligèrent à prendre une seule réceptrice, de telle sorte que la génératrice n'utilisa qu'un peu plus de la moitié de la force motrice mise à sa disposition. En outre, malgré le surcroît de dépense qui devait en résulter, il fallut recourir à des excitatrices séparées, afin de produire les champs magnétiques à l'aide de courants de basse tension, distincts du courant de la ligne et ne participant que dans une mesure insensible aux variations que ce dernier pouvait subir.

Quant à la distribution de la force à La Chapelle, elle était obtenue par un procédé qui n'avait rien d'électrique et qui ne constituait pas une véritable solution du problème. L'arbre de la réceptrice commandait par courroie une dynamo Gramme qui, à son

tour, jouait le rôle de génératrice et envoyait un nouveau courant dans diverses réceptrices actionnant les outils, marteau électrique, tour, treuil, etc. Ce procédé, qui entraîne à plusieurs transformations successives de l'énergie, n'est évidemment pas recommandable au point de vue du rendement.

La ligne, établie entre Creil et La Chapelle, avait une longueur de 56 kilomètres et une résistance totale de 97,45 ohms. Elle se composait de deux conducteurs en bronze silicieux de 5 millimètres de diamètre, isolés sur les deux tiers du parcours au moyen d'une enveloppe en chanvre trempée dans la résine et enfermée dans un tube en plomb. Les expériences montrèrent que cette précaution était non seulement inutile, mais même dangereuse ; le câble agissant comme un condensateur, plusieurs décharges eurent lieu à travers l'air sous l'effet de la haute tension.

Dans les expériences exécutées le 24 mai 1886 devant la Commission de l'Académie des sciences, les vitesses ont varié de 168 à 218 tours pour la génératrice, et de 244 à 295 pour la réceptrice ; l'intensité de 6,85 à 9,85 ampères ; les forces électromotrices de 4 887 à 6 290 volts pour la génératrice et de 3 902 à 5 081 pour la réceptrice. Quant à la force motrice, il a été dépensé à Creil de 66,7 à 116 chevaux et on a recueilli à Paris de 27,2 à 52 chevaux, de telle sorte que, d'après les chiffres de la Commission, le rendement industriel a été compris entre 40,78 et 44,81 p. 100.

Nous citons ces chiffres tels qu'ils ont été fournis par la Commission de l'Académie des sciences, mais nous n'en garantissons aucunement l'exactitude, car ils proviennent de mesures électriques et mécaniques faites pendant les expériences et diffèrent sensiblement de ceux auxquels conduit le calcul. La Commission a constaté ce désaccord, mais elle n'en a pas donné l'explication.

En résumé, les expériences de Creil ont été loin de donner tous les résultats que ses auteurs en attendaient. Elles ont démontré la possibilité de transporter une cinquantaine de chevaux à 56 kilomètres avec un rendement de 45 p. 100, l'innocuité des courants de haute tension dans une installation bien ordonnée, et enfin l'absence de perte le long de la ligne malgré une différence de potentiel de 6 300 volts. Mais elles n'ont pas répondu au programme imposé sous le rapport de la quantité d'énergie trans-

portée et surtout de sa distribution entre plusieurs machines réceptrices. Elles ont par contre conduit à des conclusions déplorables en ce qui concerne la question des dépenses : la Commission de l'Académie a en effet estimé le prix d'une installation semblable à celle de Creil à 124 800 francs, dont 50 000 pour la génératrice, 30 000 pour la réceptrice et 44 800 pour la ligne. De pareils chiffres empêchent évidemment toute application de ce genre, d'autant plus que, comme nous allons le voir, il existe une autre solution du problème beaucoup plus économique. C'est ce qui fait que, tout en ayant une grande valeur scientifique, les travaux de M. Deprez ont beaucoup moins d'importance au point de vue industriel.

359. Expériences de M. H. Fontaine. — Le système de transport que nous venons d'examiner repose sur l'emploi de grosses machines ; c'est là son défaut principal, car, au point de vue de l'industrie, la grosse machine est une erreur. Elle offre jusqu'ici des difficultés de construction qui en augmentent singulièrement le prix ; sa masse oblige à des travaux coûteux de fondation ; enfin elle ne peut, dans une exploitation, se prêter à la variété des services qu'elle a à remplir. Les essais exécutés en octobre 1886 ont été conçus dans un tout autre ordre d'idées.

Au lieu de prendre une seule génératrice et une seule réceptrice de dimensions colossales, M. H. Fontaine a employé plusieurs dynamos Gramme ordinaires, du type supérieur, qu'il a simplement reliées en tension. L'ensemble de l'installation se composait ainsi de sept machines, quatre au départ pour produire le courant, et trois à l'arrivée pour fournir le travail utilisable ; ces deux groupes étaient séparés l'un de l'autre par deux fils métalliques d'une résistance totale de 100 ohms.

Voici les résultats obtenus le 19 octobre 1886 :

Vitesse des génératrices.	1 298 tours
Différence de potentiel aux bornes de la 1re machine	1 490 volts.
— — — 2e —	1 505 —
— — — 3e —	1 493 —
— — — 4e —	1 508 —
Différence de potentiel aux deux bornes de la ligne	5 896 —
Intensité du courant	9,34 ampères

Travail sur le piston de la machine à vapeur	112,8 chevaux
Rendement de la machine à vapeur	85 p. 100
Travail absorbé sur l'arbre des génératrices.	95,88 chevaux
Vitesse des réceptrices	1 120 tours
Travail recueilli au frein sur l'arbre des réceptrices .	49,98 chevaux
Rendement industriel	52 p. 100.

Il est bon d'ajouter que les sept machines Gramme employées ne coûtaient ensemble que 16 450 francs.

Ces expériences ont donc démontré qu'avec sept dynamos d'un type courant n'ayant chacune aux bornes qu'une différence de potentiel de 1 500 volts, il est possible de transmettre une puissance mécanique utilisable de 50 chevaux à travers une résistance de 100 ohms avec un rendement industriel de 50 p. 100.

Mais, de là à conclure à l'utilisation des forces motrices naturelles à 50 kilomètres de distance, il y a loin. M. Fontaine, dont les expériences précédentes étaient simplement destinées à montrer la supériorité au point de vue industriel de la dynamo Gramme sur la dynamo Deprez, ne croit pas que le transport de l'énergie des chutes d'eau soit toujours très avantageux.

En tenant compte des frais d'installation des moteurs hydrauliques et des dynamos, de la construction des barrages, des canaux de dérivation, de l'entretien, de l'intérêt des capitaux engagés, du rendement des dynamos, etc., on arrive souvent à une dépense totale supérieure à celle occasionnée par une machine à vapeur de même puissance, surtout quand on tient compte du prix de la chute elle-même, laquelle manque rarement de propriétaire. Toutes ces considérations ont une grande importance au point de vue économique, et l'amortissement des dépenses premières est un élément qu'on ne peut passer sous silence. Les conditions industrielles du programme ne sont pas seulement de transporter de grandes forces à des distances éloignées, il faut surtout le faire à bon marché, sinon l'on aura toujours intérêt à prendre une machine à vapeur et à lui faire fournir directement l'énergie dont on aura besoin.

360. Expériences de M. Brown. — Avant de terminer cette question, nous devons parler de l'installation

par M. Brown, d'après les principes posés par M. Fontaine. La station génératrice, située à Kriesgstetten, utilise une chute d'eau dont la puissance varie de 30 à 50 chevaux ; une turbine y actionne deux dynamos du système Brown, couplées en série et donnant, à la vitesse de 700 tours par minute, 1250 volts et de 15 à 18 ampères.

Le courant est transmis par une ligne à trois conducteurs en cuivre nu (comme dans le système de distribution Edison), de 6 millimètres de diamètre chacun. Cette ligne a une longueur d'environ 8 kilomètres et présente une résistance de 9 ohms 228. Elle est portée par 180 poteaux en bois auxquels elle est fixée par des isolateurs de MM. Johnson et Phillips.

La station réceptrice est à Soleure, dans l'usine de M. Muller-Haiber ; elle comprend deux dynamos Brown reliées en série, d'un modèle un peu plus petit que celui des dynamos génératrices.

Les quatre machines sont excitées en série ; mais elles sont munies d'un commutateur automatique qui met les inducteurs en dérivation si, par suite d'un accident quelconque, l'intensité du courant vient à dépasser la valeur au delà de laquelle les bobines pourraient être détériorées. Les résistances intérieures des machines s'élèvent à 3,797 ohms pour chaque génératrice et à 3,77 ohms pour chaque réceptrice.

Les expériences, exécutées les 11 et 12 octobre 1887, ont porté le premier jour sur une seule génératrice et une seule réceptrice, le second jour sur les deux postes complets. Toutefois, pour la facilité des mesures, le troisième fil de ligne avait été supprimé.

Nous ne pouvons entrer dans le détail des précautions prises pour effectuer les mesures et pour assurer la régularité du fonctionnement. Il est pourtant intéressant de signaler le système d'interrupteurs adopté dans le but de supprimer l'influence nuisible des extra-courants de rupture. Ces interrupteurs se composent d'un réservoir renfermant un liquide conducteur, et d'une balle métallique creuse perforée plongeant dans ce liquide. Pour rompre le circuit, on soulève simplement la balle hors du liquide ; mais le circuit ne se trouve pas immédiatement rompu, car le liquide qui s'écoule de la balle en mince filet continue la communication quelques instants après la manœuvre du commutateur ; à

mesure que le liquide s'écoule en filet plus mince, la résistance augmente graduellement et le courant diminue peu à peu jusqu'à zéro.

Les résultats que nous donnons ci-dessous sont extraits du rapport d'un Comité, présidé par le professeur Amsler, de Schaffouse, et chargé d'étudier l'installation. En considérant seulement l'expérience du 12 octobre 1887 faite avec les quatre machines, qui réalise les conditions véritables de la transmission ordinaire, on a trouvé :

	Kriegstetten.	Soleure.
Intensité du courant en ampères.	11,474	11,42
Force électromotrice en volts	1836,5	1575,3
Différence de potentiel aux bornes en volts . . .	1753,3	1655,9
Puissance mécanique totale en chevaux.	30,85	23,21
Puissance électrique totale en chevaux	28,66	24,46
Puissance électrique aux bornes en chevaux. . .	27,36	25,71
Rendement électrique des dynamos p. 100. . . .	92,9	94,9
Rendement industriel des dynamos p. 100. . . .	88,7	90,3
Rendement industriel de la transmission p. 100.	75,2	

M. Brown est donc arrivé à un rendement industriel de 75 p. 100, pour une dépense de 30 chevaux à la station génératrice : c'est un résultat supérieur à tous ceux qui ont été obtenus jusqu'à ce jour, et il est d'autant plus important qu'il est atteint dans une installation complètement industrielle, qui fonctionne depuis longtemps déjà. Il y a donc là un progrès assez sérieux qu'il est intéressant de noter et qui est dû à plusieurs causes, parmi lesquelles nous relevons :

1° L'emploi d'une ligne en fil de cuivre de diamètre assez fort pour qu'elle n'absorbe pas une trop grande énergie électrique ;

2° L'emploi de forces électromotrices élevées par rapport à l'énergie transportée qui est relativement peu considérable ;

3° L'isolation à peu près complète de la ligne.

Ce dernier point présente un grand intérêt : les expériences de Soleure ont en effet montré qu'on pouvait actuellement construire une ligne aérienne en fils nus avec une isolation presque absolue. Ce fait résulte non seulement de la concordance des chiffres trouvés pour l'intensité du courant aux deux extrémités de la ligne, mais encore de mesures spéciales effectuées après coup dans

le but de déterminer la valeur de l'isolation. Il y a donc lieu de recommander l'emploi des isolateurs Johnson et Phillips en pareille circonstance.

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

361. — Cette question est actuellement tout à fait à l'ordre du jour. Elle a été résumée dans une communication faite par M. Hospitalier à la Société de physique ; nous en reproduisons le rapport :

Les distributions d'énergie électrique par courants alternatifs sont comparables en nombre et en puissance, du moins en Amérique, aux distributions analogues par courant continu ; mais elles seraient beaucoup plus nombreuses si l'on savait convenablement utiliser l'énergie électrique distribuée sous forme alternative aux opérations électrochimiques dans lesquelles intervient l'électrolyse, si l'on pouvait emmagasiner cette énergie électrique fournie par ces courants, et enfin si l'on savait convertir facilement cette énergie électrique en travail mécanique. Pour toutes ces applications, le moteur à courant continu est resté jusqu'ici supérieur au courant alternatif. Mais les inconvénients que nous venons de signaler sont largement rachetés par un grand nombre d'avantages : simplicité de construction et économie des machines à courants alternatifs ou alternateurs ; production facile, directe ou par transformation, des forces électromotrices les plus élevées, alors qu'il est difficile de dépasser 3 000 volts avec les courants continus ; simplicité et facilité d'isolement ; enfin, facilité et simplicité de transformation, à l'aide d'appareils inertes, ne comportant aucune pièce mobile, d'un rendement très élevé atteignant 95 p. 100.

Si l'utilisation des courants alternatifs aux opérations électrochimiques et à l'emmagasinement de l'énergie électrique qu'ils transportent sont des problèmes à peine ébauchés, dont les solutions partielles restent encore dans le domaine de l'expérience, il n'en est pas de même des moteurs à courants alternatifs : les principe appliqués et les types fondés sur le même principe sont déjà si nombreux qu'ils comportent une classification bien nette.

1° Moteurs à champ constant ou moteurs synchrones ;

2° Moteurs à champ alternatif;

3° Moteurs à champ tournant.

Un moteur alternatif ne diffère pas essentiellement, en principe général, d'un moteur à courant continu : on y trouve toujours les deux mêmes parties essentielles, un champ magnétique ou *inducteur* et un système induit, tournant l'un par rapport à l'autre; mais, tandis que le champ magnétique des moteurs à courant continu est toujours *constant*, celui des moteurs à courants alternatifs est, suivant les cas, *constant*, *alternatif* ou *tournant*.

362. Moteurs à champ constant. — Ce genre de moteur, le plus anciennement expérimenté, est fondé sur le principe de la réversibilité des alternateurs. Le courant alternatif est envoyé dans une série de bobines induites se mouvant dans un champ magnétique constant produit par un aimant ou un électro-aimant. Le plus simple est constitué par une bobine de Siemens double T tournant entre les branches d'un aimant, ou d'un électro-aimant excité par une source étrangère : si l'on a préalablement lancé l'induit à une vitesse angulaire correspondant à la fréquence du courant alternatif fourni par l'alternateur (50 tours par seconde, par exemple, si la fréquence du courant alternatif est de 50), le mouvement de la bobine induite se continuera synchroniquement et suivra toutes les variations de vitesse de l'alternateur, à moins que l'on ne vienne appliquer brusquement sur l'axe un couple résistant dépassant une certaine valeur : le synchronisme cesse et le moteur s'arrête en un temps généralement très court. La théorie de ces moteurs a été developpée, en 1884, par M. Dr Hopkinson. La nécessité d'amener initialement le synchronisme et d'exciter les inducteurs par une source étrangère dans le cas de grandes puissances, et l'obligation de marcher à vitesse angulaire rigoureusement constante ont empêché ces moteurs de recevoir de nombreuses applications industrielles.

Moteurs Zipernowsky. — M. Zipernowsky a fait disparaître deux des plus graves inconvénients propres à ces moteurs en les rendant auto-excitateurs, l'excitation étant empruntée à une dérivation dans laquelle est intercalé un redresseur de courants. L'induit,

formé de bobines plates, est fixe et renfermé dans une carcasse en fer qui donne au moteur le même aspect que celui des génératrices à courants alternatifs de la maison Ganz. L'inducteur mobile est composé de bobines montées radialement sur l'axe de la machine.

Le commutateur fixé sur le même arbre comprend autant de sections que l'inducteur a de bobines; les sections de rang pair sont reliées à l'une des extrémités du courant inducteur, et les bobines de rang impair à l'autre. Cette liaison est obtenue au moyen d'une paire de balais montés en dérivation sur le circuit principal de la machine génératrice. La position des balais est réglée de façon que la commutation ait lieu au moment du passage des inducteurs devant les bobines induites.

Si l'on donne une première impulsion, le moteur se met en marche avec une vitesse croissante jusqu'à ce que le synchronisme soit atteint, pourvu qu'on supprime la charge et que le démarrage se fasse à vide, et il atteint rapidement sa vitesse angulaire de régime qu'il maintient ensuite parfaitement, malgré les variations brusques dans le couple résistant.

Mais à chaque changement de sens du courant, les bobines de l'inducteur sont le siège d'un extra-courant énergique dont la production se manifeste par des étincelles aux balais; l'intensité du champ subit en même temps de fortes variations qui influent sur la régularité de la marche du moteur. M. Zipernowsky a évité cet inconvénient en mettant les inducteurs en court circuit sur eux-mêmes quelques instants avant la commutation. A cet effet on monte quatre balais réunis par paires, au lieu de deux, et décalés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de section environ. En réglant convenablement leurs positions respectives, l'extra-courant et le courant principal se contre-balancent et les étincelles sont supprimées.

Le rendement de ces moteurs est des plus satisfaisants, car il atteint 80 p. 100 pour un moteur de 4 kilowatts. Malgré, ou, plus exactement, à cause du synchronisme nécessaire au fonctionnement de ces moteurs, il en a été fait un certain nombre d'applications à des transports de force motrice à distance.

363. Moteurs à champ alternatif. — Toute dynamo à courant con-

tinu alimentée par des courants alternatifs peut se mettre en marche et tourner en produisant une puissance mécanique appréciable; car elle est comparable à un électrodynamomètre dont le couple de torsion reste toujours de même signe malgré les inversions de sens du courant. Mais un moteur ainsi constitué présente de nombreux et graves inconvénients : les inversions rapides du courant développent dans les noyaux des inducteurs des courants de Foucault qui réduisent considérablement le rendement du moteur si l'on n'a pas pris la précaution de feuilleter ces inducteurs ; le grand coefficient de self-induction des circuits du moteur réduit l'intensité efficace, et, par suite, la puissance spécifique d'un moteur de dimension donnée.

Pour ces raisons, les moteurs de ce genre sont peu employés, si ce n'est pour la production de faibles puissances; nous signalerons, par exemple, les moteurs qui actionnent des petits ventilateurs domestiques, dépensant un à deux ampères sous une différence de potentiel efficace de 50 volts, appareils très employés actuellement en Amérique.

L'excitation de ces moteurs est tantôt disposée en shunt, tantôt en série. En supprimant le fer dans les inducteurs et les induits, on peut également réaliser un moteur électro-dynamique de faible puissance spécifique, mais dont le couple moteur est, à chaque instant, proportionnel au produit des intensités des courants qui traversent respectivement les inducteurs et l'induit. Le moteur du compteur d'énergie du professeur Elihu Thomson est le type du moteur électro-dynamique.

Pour éviter les pertes provenant des inversions rapides d'aimantation dans les inducteurs des moteurs à champ alternatif, M. Mordey a proposé de faire passer le courant alternatif par un redresseur monté sur l'axe même du moteur. Au moment de la mise en marche, l'action du redresseur est nulle, mais au fur et à mesure de l'accroissement de vitesse angulaire, le courant traversant le moteur se trouve de plus en plus redressé, c'est-à-dire que la fréquence des inversions diminue, ce qui réduit d'autant les pertes causées par ces inversions et améliore le rendement.

C'est aussi dans la classe des moteurs à champ alternatif qu'il convient de placer les moteurs à induit fermé. Les expériences de

répulsion électro-dynamique du professeur Elihu Thomson ont montré qu'un circuit fermé, placé dans un champ alternatif, tend à se déplacer de façon à rendre minimum son coefficient d'induction mutuelle, c'est-à-dire le flux de force qui le traverse. Si l'on place dans ce champ alternatif une série de bobines élémentaires mobiles autour d'un axe commun, et qu'un système de balais convenablement disposé ferme chacune des bobines en court-circuit au moment où le flux qui la traverse est maximum, et l'ouvre au moment où le flux devient nul, pour la laisser en circuit ouvert jusqu'au moment où le flux redeviendra maximum, chacune de ces bobines sera soumise à une force, et, par suite, produira un couple moteur que la multiplicité des bobines rend sensiblement constant. Dans ce moteur, il n'y a aucune connexion entre le circuit inducteur et le système induit. Le circuit inducteur est métalliquement fermé sur les fils venant du générateur, le circuit induit est fermé sur lui-même. L'expérience est facilement réalisable avec une petite machine Gramme ou Rechniewski à deux pôles, en ayant soin de décaler les balais de 45° environ dans le sens de la rotation.

Les moteurs à champ alternatif sont peu employés, et il n'a pas été publié jusqu'ici d'expérience indiquant leur rendement.

364. Moteur à champ tournant. — M. Ferraris a indiqué pour la première fois, en mars 1888, le principe des moteurs à courants alternatifs, moteurs dont le développement actuel fait prévoir à bref délai une véritable révolution aussi bien dans le transport des grandes forces motrices à de grandes distances que dans la distribution de l'énergie électrique pour moteurs de faible puissance.

Voici d'abord le principe établi par M. Ferraris : Lorsque deux courants alternatifs de même période, mais décalés l'un par rapport à l'autre d'un quart de période, traversent deux circuits disposés rectangulairement, la résultante des deux champs magnétiques que produirait chaque circuit, s'il était seul, est un champ magnétique tournant d'intensité constante et de vitesse angulaire uniforme, faisant un tour complet pendant la durée d'une période. Si l'on place dans ce champ tournant un circuit fermé sur lui-même, il sera le siège de courants induits, et ces courants induits ten-

dront à faire tourner le circuit induit dans le sens de la rotation du champ.

On peut aussi dire, avec plus d'exactitude, que le moteur à champ tournant fonctionne en vertu des courants de Foucault, dont il est le siège. Ces courants de Foucault seraient nuls si le circuit était immobile dans le champ, c'est-à-dire si le circuit tournait à la même vitesse angulaire que le champ, et c'est pour satisfaire à cette condition d'immobilité relative que, le circuit tournant dans le champ et dans le même sens que lui, le circuit *suit* le champ.

Bien que d'invention relativement récente, les moteurs à champ tournant sont déjà très variés comme principes et comme dispositions. Ils se distinguent principalement par le mode de production du champ tournant et par le générateur qui alimente le moteur. Nous examinerons successivement les moteurs à courants alternatifs ordinaires, et les moteurs alternateurs à phases multiples produisant des courants *polyphasés*.

Alternateurs ordinaires. — Plusieurs procédés permettent d'obtenir, avec un courant alternatif ordinaire, deux courants alternatifs décalés d'un quart de péoride et capables, par suite, de produire un champ tournant.

M. Ferraris a proposé deux circuits alimentés, le premier directement par l'alternateur, le second par le circuit secondaire d'un transformateur dont le circuit primaire est monté en dérivation sur l'alternateur.

M. Tesla qui, au début, employait deux circuits distincts où circulaient deux courants de phases différentes, ne se sert plus maintenant que d'un seul courant dérivé sur deux circuits de résistance et de self-induction différentes, de façon à présenter dans ces circuits la différence de phase nécessaire.

Le retard de phase d'un courant alternatif est en effet directement proportionnel à la self-induction et en raison inverse de la résistance du circuit. Il est donc nécessaire, pour assurer la différence de phase entre les deux circuits du moteur, de faire dans l'un la self-induction considérable et la résistance faible, et dans l'autre la self-induction beaucoup plus faible et la résistance beaucoup plus considérable. M. Tesla a obtenu ce résultat en constituant le pre-

mier circuit avec du gros fil de faible résistance présentant un très grand nombre de tours et enveloppé de fer, et le second avec un petit nombre de spires de fil fin et très résistant.

M. Schallenberger dispose un circuit induit fermé sur lui-même et placé obliquement par rapport au circuit primaire alimenté par l'alternateur. Les réactions du circuit principal et du circuit induit produisent un champ tournant. Enfin dans le moteur de MM. Hutin et Leblanc, le champ tournant est produit par deux séries de bobines montées en dérivation, mais en intercalant un condensateur dans l'un des circuits. On obtient ainsi très facilement le décalage d'un quart de période nécessaire à la production du champ tournant.

Alternateurs à phases multiples ou à courants polyphasés. — Les solutions indiquées précédemment conviennent à la distribution de la force motrice et à l'alimentation des moteurs de puissance moyenne ou de faible puissance. Pour les transports de grandes puissances, on préfère avoir recours à des générateurs spéciaux, produisant non plus un courant alternatif ordinaire, mais plusieurs courants alternatifs *polyphasés.*

On peut employer, comme une solution plus simple, *deux* courants amenés par quatre fils, ou trois fils seulement en se servant d'un fil de retour commun. Des dispositions de ce genre ont été préconisées par MM. Ferraris et Tesla. Étant donnée l'obligation d'avoir trois fils, on préfère les utiliser à la production de *trois* courants d'égale période, mais décalés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période, en profitant de cette observation que, pour trois courants ainsi décalés, la somme algébrique des intensités à chaque instant est toujours nulle, chacun des fils servant de retour aux courants traversant les deux autres circuits au même instant.

Tel est le principe des moteurs à courants polyphasés réalisés depuis moins de deux ans par MM. Dolivo-Dobrowolsky, Haselvander, Bradley et Wenstrœm.

365. Expérience de Francfort. — Un transport d'une force motrice de 300 chevaux, fondé sur des courants de ce genre, a été entrepris par les ateliers d'Oerlikon pendant l'Exposition d'électricité de Francfort-sur-le-Mein, entre Heilbronn et Francfort, sur une

distance d'environ 180 kilomètres. Ce transport est effectué à l'aide de courants à trois phases engendrés à basse tension et transformés à haute tension 20 000 à 30 000 volts, par des transformateurs isolés au pétrole, spécialement combinés dans ce but par M. Brown. A l'arrivée, ces courants sont transformés de nouveau en courants de basse tension par un transformateur analogue au premier, et finalement envoyés dans un moteur à champ tournant et à courants triphasés.

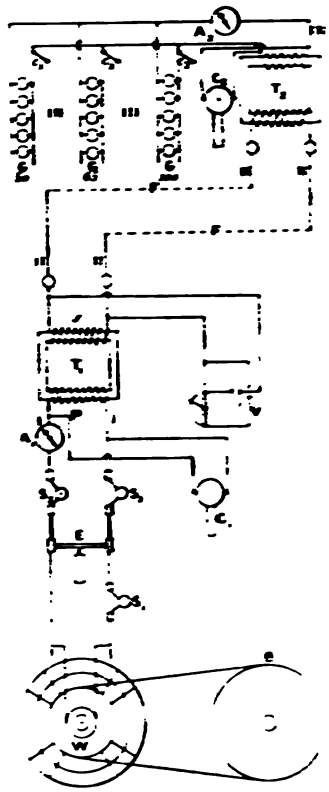


Fig. 226.

Voici d'ailleurs à ce sujet quelques détails qu'il nous paraît intéressant d'ajouter pour montrer comment un pareil problème a pu être résolu.

La perte de tension admise étant de 10 p. 100, on a pris un conducteur à trois fils de 4 millimètres de diamètre et de 38 millimètres carrés de section. Le courant doit avoir dans ce câble une intensité de 8 ampères et une tension de 27 600 volts.

La commission directrice de l'Exposition a fait procéder, dans l'usine d'Œrlikon, à des expériences préalables qui ont eu lieu le 24 janvier 1891, dans les conditions suivantes :

La figure 226 montre la disposition des appareils.

B, force motrice ;

W, dynamo génératrice du courant alternatif ;

S_1, S_2, S_3, coupe-circuits de sûreté ;

A_1, A_2, ampèremètres ;

T_1, T_2, transformateurs ;

C_1, C_2, voltmètres Cardew ;

V, voltmètre Thomson ;

FF, conducteur à grande distance (I circuit primaire secondaire) ;

La tension de la machine génératrice à courants alternatifs peut atteindre 40 à 100 volts, suivant le nombre de tours. L'intensité est de 4 000 ampères. Cette énergie à basse tension est transmise au transformateur T_1 par le conducteur primaire I. Ce conducteur est muni d'un coupe-circuit S_1 très sensible, d'un commutateur bipolaire E et de deux coupe-circuits S_2, S_3 du système Cockburne; ils sont formés d'un fil de plomb auquel est fixée une balle de plomb présentant un poids relativement lourd. Ils sont placés dans le conducteur primaire parce que c'est dans celui-ci que se trouve la plus grande intensité. Si, par suite d'un accident, tel qu'un défaut d'isolation ou un court-circuit, l'intensité devient trop forte et si le fil de plomb est près du point de fusion, le poids de la boule détermine aussitôt sa rupture, et il ne peut se produire un rétablissement de circuit par le plomb fondu restant adhérent. L'ampèremètre A donne l'intensité du circuit primaire; le voltmètre C indique sa tension.

Le transformateur T_1, système Brown, comporte un noyau prismatique formé de disques en tôle de fer, sur lequel sont deux bobines de section circulaire isolées l'une de l'autre; l'une porte l'enroulement primaire, l'autre l'enroulement secondaire.

L'isolement est obtenu par du caoutchouc durci. Ce corps suffit parfaitement; mais si une déchirure vient à s'y produire, une décharge peut avoir lieu à travers la fente. Pour l'éviter, on a plongé le transformateur dans un vase plein d'huile, et on a mis ainsi l'isolation à l'abri de tout danger.

Le transformateur est combiné pour multiplier la tension primaire par 300. Les tensions de 40 à 110 volts fournies par la dynamo à courants alternatifs donnent donc 12 000 à 33 000 volts dans le circuit secondaire.

La tension dans le conducteur secondaire est mesurée par un voltmètre électrostatique de William Thomson. Le conducteur secondaire est relié au transformateur T_2, dans lequel le rapport de transformation est $\frac{300}{1}$; la tension est donc ramenée à ce qu'elle était en sortant de la machine W.

Sur la conduite III sont disposés : un ampèremètre A_2, un voltmètre C_2 et trois séries comprenant chacune 10 lampes à incandescence en dérivation prenant respectivement 50, 65 et 100 volts.

On intercale l'une ou l'autre de ces séries suivant la tension expérimentée. Les expériences ont été faites sur des tensions secondaires de 12 000, 15 000, 20 000, 30 000 et 33 000 volts.

Le conducteur est isolé de la terre par des isolateurs en porcelaine du système Johnson-Phillips décrit précédemment.

Pour essayer les coupe-circuits, on a produit un court-circuit entre les deux conducteurs secondaires, en interposant entre eux un fil de cuivre. Or, on n'a pas observé la moindre trace de brûlure ni sur ces deux conducteurs, ni sur le fil de cuivre. On a encore essayé un courant de décharge ; on a fixé aux conducteurs secondaires deux bouts de fil dont les extrémités étaient éloignées de 22 millimètres. Quand la tension du courant a atteint 18 000 volts, un arc s'est formé et a disparu aussitôt, par suite de la fusion des plombs de sûreté.

Pour éprouver les isolateurs, on les a arrosés par un jet d'eau. Un voltmètre Cardew intercalé entre le conducteur secondaire et la terre n'a indiqué aucune dérivation.

Nous avons déjà énuméré précédemment les avantages des courants à forte tension pour les grandes distances. Le calcul montre que l'on peut transporter fort loin de grandes quantités d'énergie avec une perte très faible en disposant d'une tension convenable. Jusqu'à présent on n'a guère dépassé 2 000 à 3 000 volts ; mais l'emploi des courants alternatifs permet de dépasser cette limite. En effet, tandis que les machines à courant continu se prêtent peu à des tensions considérables par suite de la disposition de l'enroulement et la nécessité d'un collecteur, au contraire, la constitution de l'armature de l'alternative dont les différentes parties sont entièrement séparables et dont chacune n'engendre qu'une fraction de la tension totale, l'absence de collecteur, la fixité de l'armature et la rotation du champ magnétique rendent cette machine plus propre à la production des hautes tensions.

D'autre part, les moteurs à champ tournant, étant des appareils à circuit induit métalliquement fermé, ne peuvent donner naissance à aucune étincelle d'extra-courant ni à aucune rupture dangereuse ; la seule interruption nécessaire est celle du commutateur de mise en marche ou d'arrêt, et comme elle a lieu en un point

spécial où toutes les précautions peuvent être prises, il ne peut en résulter aucun accident.

Mais toutes les machines produisant directement de hautes tensions présentent toujours quelques dangers pour le personnel de service. L'emploi des transformateurs supprime cet inconvénient; car ils permettent de changer un courant alternatif de n'importe quelle tension en un autre de tension plus élevée ou inférieure. On peut alors adopter la disposition que nous avons décrite dans les expériences d'Oerlikon.

Le générateur est un alternateur à tension aussi faible que possible. Le courant produit passe dans un transformateur, où il se change en courant à très haute tension qui est envoyé dans la ligne. Avant d'être livré, le courant circule dans un second transformateur, qui abaisse sa tension et permet de le distribuer.

Une pareille installation entraîne, comme on le voit, une certaine complication ; mais la dépense nécessitée de ce chef est largement compensée par l'économie réalisée sur le conducteur. Voici un exemple cité par M. Brown (Société électrique de Francfort-sur-le-Mein).

Supposons qu'on ait à transporter 500 chevaux à 20 kilomètres. D'une part, on pourra, par exemple, produire le courant à 5 000 volts dans les dynamos et consentir une perte de 10 p. 100 dans les conducteurs. D'autre part, on peut porter la tension à 30 000 volts par la transformation, et travailler à 3 p. 100 de perte seulement. Dans le premier cas, il faudrait un conducteur en cuivre de 90 millimètres carrés ; dans le second cas, un conducteur de 9 millimètres carrés seulement, ce qui donne un poids de cuivre de 32 tonnes pour le premier et de 3,2 tonnes pour le second. Le poids de cuivre est donc réduit au dixième ; et pourtant la tension admise de 5 000 volts pour le premier cas est déjà passablement élevée.

Faisons maintenant la comparaison pour l'effet utile.

L'effet utile d'une machine de 500 chevaux à 5 000 volts s'élève au maximum à 92 p. 100 ; comptons sur une perte de 10 p. 100 pour la conduite ; cela fait 83 p. 100 de rendement à l'autre bout. Dans le second cas, l'effet utile de la combinaison de dynamo et transformateur monte à 90 p. 100 ; le rendement de la conduite à

97 p. 100 ; l'effet utile du transformateur secondaire à 97 p. 100. Le rendement final sera donc supérieur à 84 p. 100. A cela il faut ajouter que le courant arrive sur place à l'état qu'on veut, tandis que dans le premier cas il faut le prendre à 4 500 volts environ, c'est-à-dire sous une tension fort peu commode qu'il faudra souvent transformer.

Ceci démontre péremptoirement que la deuxième combinaison est plus économique que la première.

Nous n'ajoutons aucun commentaire aux opinions émises par M. Brown. Le problème est posé, et l'expérience seule pourra décider. Il est probable que bien des difficultés de détail retarderont la solution. Nous avons voulu attirer l'attention de nos lecteurs sur ce point qui présente un intérêt capital; car l'emploi de courants à 25 000 ou 30 000 volts rendrait possible la transmission électrique à très grande distance et permettrait d'utiliser beaucoup de forces naturelles qui se dépensent aujourd'hui inutilement.

CINQUIÈME PARTIE

GALVANOPLASTIE ET ÉLECTRO-MÉTALLURGIE

---

366. — L'électrolyse a donné naissance à deux industries importantes : la galvanoplastie et l'électro-métallurgie. La galvanoplastie est venue la première ; confinée d'abord dans les laboratoires, elle s'est développée peu à peu ; ses progrès ont suivi ceux de l'électricité et maintenant elle est devenue tout à fait industrielle. L'électro-métallurgie vient de naître depuis quelques années seulement, les principes sur lesquels elle repose sont les mêmes que pour la galvanoplastie, mais l'application en a été impossible pendant fort longtemps. Tant qu'on en a été réduit à produire l'électricité au moyen de la pile, on n'a pu songer à l'utiliser pour l'extraction et le raffinage des métaux. La pile coûte très cher ; elle exige un entretien dispendieux ; elle occupe une place très considérable dans les ateliers où elle répand souvent des vapeurs nuisibles. La galvanoplastie pouvait s'en contenter parce qu'elle opérait, surtout à ses débuts, sur une quantité de métal assez limitée et, comme elle était appliquée principalement à la dorure et à l'argenture, le prix des matières premières et de la main-d'œuvre laissait assez d'écart pour qu'on pût négliger un peu la dépense occasionnée par la production de l'électricité. Le programme de l'électro-métallurgie n'est plus le même : il faut produire beaucoup et avec économie ;

les différences de prix des métaux bruts portent sur quelques centimes. Dans ces conditions, il était nécessaire de se procurer l'électricité à bon marché. Les machines électriques pouvaient seules résoudre ce problème, et sans elles cette industrie était absolument impraticable.

Qu'il s'agisse d'extraire un métal de son minerai ou de décomposer une dissolution saline pour précipiter le métal sous une forme quelconque, les principes sur lesquels on s'appuie sont les mêmes. Ce sont les lois de Faraday, que nous avons exposées dans la première partie de cet ouvrage. On utilise toujours la propriété que possède un courant électrique, traversant une dissolution saline, de décomposer le sel de telle façon que le métal se porte au pôle négatif.

CHAPITRE PREMIER

GALVANOPLASTIE

MODELAGE

367. — La galvanoplastie, par laquelle nous allons commencer notre étude, a deux buts principaux :

1° Elle est d'abord destinée à reproduire des modèles au moyen d'un moule dans lequel le métal est précipité par l'électrolyse.

Cette industrie comprend le moulage des médailles, des clichés typographiques de la gravure, la reproduction des objets d'art, bas-reliefs, statues. C'est, en un mot, un *modelage* électrique.

2° Elle a aussi pour but de déposer à la surface d'un corps une couche métallique destinée généralement à le protéger contre les influences atmosphériques ou à lui donner un aspect plus décoratif ; cette partie comprend la dorure, l'argenture, le cuivrage, le nickelage, etc.

368. Fabrication des moules. — Commençons par le modelage.

La première opération est la fabrication des moules ; pour cet usage, on emploie des recettes diverses. On se sert d'alliages métalliques très fusibles ou de matières neutres, analogues à la cire, dont on rend la surface conductrice.

Moules métalliques. — On fait un alliage de la façon suivante :

Bismuth	280 grammes.
Etain.	100 —
Plomb	190 —

Cet alliage fond à une basse température (quelques degrés au-dessous de 100°). Pour l'employer à la reproduction des médailles, on le fait fondre dans une cuiller de fer et on le verse sur un marbre ; puis, de quelques centimètres de hauteur, on laisse tomber sur l'alliage la médaille qu'on veut reproduire et qui doit être *très froide*. En quelques secondes le métal est solidifié, et on le sépare du modèle par de légers chocs. On obtient ainsi un moule d'une excessive finesse.

Le métal fusible ne se dispose pas toujours en une masse arrondie propre à recevoir la médaille. Si le marbre n'est pas bien de niveau, l'alliage s'écoule ; pour l'en empêcher, on creuse dans le marbre une petite cavité.

On obtient encore des moules métalliques par le mélange suivant :

Bismuth	250	grammes.
Étain	125	—
Plomb	160	—
Antimoine	30	—

On emploie cet alliage fondu à consistance pâteuse, et l'on y applique l'objet à reproduire que l'on frappe d'un coup léger et bien d'aplomb.

Lorsqu'un moule en métal fusible est terminé, on en vernit le revers et les bords, ainsi que la partie qui existe autour de l'empreinte. Un bon vernis consiste en cire à cacheter dissoute dans l'alcool.

Moules en cire et en stéarine. — Ces moules sont formés de cire blanche ordinaire ou de stéarine. Pour les obtenir, on verse cette matière fondue sur la médaille, après avoir préalablement chauffé celle-ci et avoir enduit sa surface d'un peu d'huile d'olive. On laisse le tout refroidir pendant cinq ou six heures avant de détacher le moule du modèle.

On a encore de bons résultats par le mélange suivant :

Gélatine	500	grammes.
Eau	700	—
Cire	15	—

On fait dissoudre la gélatine dans l'eau légèrement chauffée et

l'on ajoute à la solution de la cire d'abeilles en petits morceaux.

On peut aussi composer ces moules comme suit :

Blanc de baleine.	225	grammes.
Cire	50	—
Graisse de mouton.	50	—

En ajoutant de la plombagine à l'un de ces mélanges, on a des empreintes très délicates. Le résultat est encore meilleur en remplaçant la plombagine par le blanc de céruse.

Les compositions que nous venons de décrire servent surtout pour la reproduction des médailles et des clichés.

Moules en plâtre. — On fait encore des moules de plâtre fin que l'on imprègne de cire ou de suif. Le modèle légèrement recouvert d'huile est d'abord enduit avec un pinceau d'une couche mince de plâtre liquide, et l'on verse ensuite par-dessus la quantité de plâtre nécessaire pour obtenir un moule assez épais.

Lorsque l'objet présente des parties rentrantes, le moule en plâtre est composé de plusieurs portions que l'on réunit ensuite, comme les pièces des moules destinés à la fonderie.

Moules élastiques. — Ils s'obtiennent par un mélange intime de 100 grammes de mélasse pour 400 de colle forte. Ces moules peuvent s'appliquer à des pièces de *haut-relief* sur lesquelles on ne pourrait employer les compositions ordinaires, parce que ce mélange se laisse développer facilement et revient à la forme du modèle dès que celui-ci est dégagé.

Moules en gutta-percha. — De toutes les substances employées pour le moulage, il n'en est pas de plus commode que la gutta-percha. On peut la contourner, la laminer, la travailler de toutes les façons, en faire des membranes impalpables ou des plaques épaisses ; elle se prête à toutes les exigences du modelage. Douée d'une grande résistance à la température ordinaire, elle se ramollit quand elle est plongée quelques instants dans l'eau chaude, et acquiert une plasticité qui lui permet de prendre les empreintes les plus délicates. La gélatine seule rivalise avec elle pour la finesse des résultats ; mais cette dernière se détériore trop vite et exige beaucoup de précautions. Enfin, la gutta-percha peut être impu-

nément plongée dans les alcools, les acides, les dissolutions salines

Le moulage à la gutta se pratique de différentes façons, suivant qu'il s'agit d'un relief peu prononcé ou d'un objet de haut-relief et de *difficile dépouille*.

Dans le premier cas, c'est-à-dire pour les médailles, planches gravées, objets de bijouterie, on découpe dans une feuille de gutta un morceau qu'on plonge quelques instants dans l'eau bouillante et qu'on pétrit pendant quelque temps ; on l'applique sur l'objet en question préalablement frotté de savon, jusqu'à ce que la température se soit notablement abaissée.

Quand il s'agit de pièces de plus grande dimension, on se sert de deux plateaux en gutta solide *a*, *a*, de 5 centimètres d'épaisseur, placés dans une rondelle en fer *zz* (fig. 227) ; on fait une galette en gutta-percha molle que l'on place sous le plateau supérieur avec interposition de plombagine, pour empêcher l'adhérence.

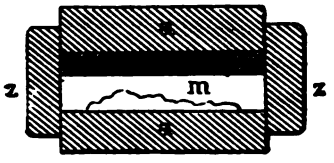


Fig. 227.

L'objet à reproduire est disposé en *m*, et le tout est soumis à l'action d'une presse hydraulique.

Après la pression, l'objet *m* est détaché du moule par simple traction.

Pour les objets présentant des saillies prononcées et des parties refouillées, on prend de la gutta ramollie que l'on pétrit et qu'on applique à la main sur le modèle enduit de savon, de façon à pénétrer dans les creux et à reproduire toutes les saillies. Quand le moulage est fini, on laisse refroidir la gutta et on retire le modèle.

Dans le cas où le moule ne se prêterait pas à l'extraction du modèle on le tremperait quelques instants dans de l'eau chaude. La chaleur assouplit la gutta ; mais en revenant à la température ordinaire, cette substance reprend, grâce à sa souplesse, les empreintes qu'on lui avait confiées.

Quand ces moules en gutta sont terminés, on les lave pour les débarrasser du savon, on les fait sécher et on les métallise par le procédé que nous allons indiquer plus loin.

Quel que soit le système de moulage, cette opération exige des précautions spéciales que nous ne pouvons décrire dans notre

ouvrage, et il y a des *tours de mains* que l'expérience seule doit enseigner. Ce sont des questions qui rentrent plutôt dans le domaine de l'ouvrier que dans celui de l'ingénieur.

Métallisation des moules. — Tous les moules que nous avons décrits, sauf ceux qui sont formés d'un alliage métallique, ne sont pas conducteurs de l'électricité ; afin qu'ils puissent se recouvrir d'un dépôt électrolytique, il est indispensable que leur surface soit rendue conductrice. Dans ce but, on emploie généralement la plombagine ; cette substance, qui se présente en poudre impalpable, n'altère nullement la finesse des moules et leur donne une très grande conductibilité. Le moule est humecté très légèrement par un peu de vapeur d'eau ; puis on trempe dans la plombagine un pinceau très souple avec lequel on frotte rapidement la surface, jusqu'à ce qu'elle présente un aspect brillant et uniforme.

Quelquefois on remplace la plombagine par le composé suivant : on fait fondre du zinc dans une cuiller en fer jusqu'à ce qu'il soit près d'entrer en combustion et l'on y projette alors quelques fragments de fer. Ce produit, réduit en poudre très friable, est mélangé à de la plombagine et appliqué comme cette dernière.

On peut aussi mélanger à la plombagine de la *poudre de bronze* obtenue comme il suit : dans une solution saturée et bouillante de sulfate de cuivre on ajoute des fragments de zinc distillé ; quand tout le cuivre s'est précipité sur le zinc, on décante et l'on traite ce dernier métal par l'acide sulfurique qui le convertit en sulfate. Après une nouvelle décantation et un lavage, on fait sécher la poudre métallique que l'on peut employer seule ou avec la plombagine pour métalliser les moules.

369. Disposition des moules dans les bains. — Ces opérations préliminaires étant terminées, le moule est plongé dans le bain métallique. Les reproductions des médailles, des clichés, se font généralement en cuivre. Les bains sont formés d'une dissolution de sulfate de cuivre ; nous en décrirons plus tard la composition.

Ordinairement les moules sont placés en face des anodes ; ils sont toujours reliés au pôle négatif de la source électrique.

Certains moules doivent être mis sous l'anode horizontalement

dans une cuve plate. Cette disposition est utile quand les modèles présentent des reliefs assez prononcés.

Si une empreinte en métal fusible est plongée dans la solution cuivreuse avant que la batterie soit en action, le liquide se décompose et il se dépose sur le moule une couche d'oxyde. Cet accident n'a pas lieu si l'on met le moule dans l'appareil une fois que toutes les autres pièces y sont placées ; on complète alors le circuit par l'immersion du moule dans le bain. Grâce à cette précaution, le moule se recouvre immédiatement d'une couche de cuivre.

Avec des moules en cire ou gutta recouverts de plombagine, l'opération ne marche pas aussi rapidement qu'avec les moules métalliques. Le dépôt se fait peu à peu ; il commence près des points d'attache du conducteur et s'étend progressivement ; la force du courant est donc au début concentrée dans un petit espace ; aussi, arrive-t-il quelquefois que ce premier dépôt est accompagné d'un dégagement d'hydrogène et que le métal est cassant près du conducteur. Pour y remédier, on diminue autant que possible l'intensité électrique au début de l'opération et l'on emploie comme anode un fil de cuivre au lieu d'une plaque ; on le plonge peu à peu dans le liquide jusqu'à ce que tout le moule soit recouvert, et c'est alors seulement qu'on remplace le fil par une plaque en métal.

Il se dégage quelquefois des bulles d'air dans les anfractuosités des moules ; on les fait disparaître en passant une plume ou un pinceau doux sur la surface du moule.

Quand on veut reproduire un modèle en ronde-bosse présentant des saillies prononcées, on introduit dans l'intérieur du moule, ouvert à sa partie inférieure pour le renouvellement du liquide, une sorte de carcasse en fils métalliques reliés au pôle positif. Le courant qui, sans cette précaution, aurait difficilement atteint les cavités du moule, se répartit sur toute sa surface et le dépôt se fait d'une manière uniforme. Ces fils, suivant la nature des bains, sont en platine, en cuivre ou en plomb. On les isole du moule avec un tube en caoutchouc.

Quand on a déposé dans l'intérieur d'un moule une couche de cuivre de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur, on donne de l'épaisseur

à la pièce en coulant du laiton dans l'intérieur. On prend un fil de laiton de 1 à 2 millimètres de diamètre, que l'on coupe en petits morceaux et dont on remplit l'intérieur de la pièce, en ayant soin d'y mêler un peu de borax en poudre; puis on la soumet à l'action d'un chalumeau à gaz. Le laiton fond, et le cuivre, qui résiste à cette température, se trouve ainsi consolidé par une forte couche métallique.

370. Dépôts adhérents. — *Décapage des pièces.* Quand on opère sur des moules, on les place directement dans le bain sans autre opération préalable que la métallisation. Mais quand il s'agit de déposer par l'électrolyse une couche métallique adhérente à la surface d'un autre métal, il y a une précaution importante à prendre, c'est le décapage de cette surface. L'interposition d'un corps étranger, en quantité infiniment petite, suffit pour empêcher l'adhérence des deux métaux et produire des *cloques*. Les ennemis qu'on a à combattre sont les corps gras et les oxydes; on peut s'en débarrasser par voie sèche, en frottant les surfaces avec du sable, du papier de verre ou d'émeri.

Mais ce procédé est assez restreint, et la voie humide est bien préférable. Les oxydes sont dissous dans des bains acides; les corps gras, dans des solutions alcalines.

Pour le fer, on fait usage d'acide sulfurique étendu d'eau. Pour le cuivre, on se sert d'acide azotique dilué et quelquefois d'un mélange d'acide azotique et de sel marin.

Parmi les solutions alcalines employées dans le décapage, nous citerons la soude caustique et un mélange de soude et d'ammoniaque.

COMPOSITION DES BAINS

Nous allons examiner maintenant la composition des différents bains généralement adoptés aussi bien pour reproduire des modèles que pour obtenir des dépôts adhérents.

371. Argenture. — 1° *Bain au cyanure.* Les bains d'argent sont

généralement formés de cyamures doubles d'argent et de potassium.

Il faut commencer par préparer une solution d'argent. Pour cela, on fait un mélange de :

Argent pur en fragments.	31 grammes.
Acide nitrique.	31 —
Eau	15,5 —

L'argent se dissout à l'état d'azotate que l'on fait cristalliser. La liqueur ne peut être employée si elle contient du cuivre, ce que l'on reconnaît à une légère teinte verte. On extrait alors l'argent de la dissolution, en y plongeant des morceaux de cuivre. L'acide azotique se combine à ce métal, et l'argent se précipite sous forme d'une poudre grise, qu'on lave dans de l'acide sulfurique étendu d'eau et qu'on redissout dans l'acide azotique.

L'azotate d'argent, dès qu'il est parfaitement pur, est transformé en cyanure, suivant différents procédés que nous allons examiner successivement.

Procédés Watt. — Voici trois formules indiquées par M. Watt :

1° Dans un vase contenant de l'eau de chaux, on jette peu à peu les cristaux d'azotate obtenus comme nous venons de le dire. La solution, qui d'abord était incolore, se trouble ; l'oxyde d'argent se précipite sous forme d'une poudre brune, qu'on lave avec soin. Il ne faut pas sécher cette poudre, mais la conserver dans des vases pleins d'eau. Pour composer un bain de galvanoplastie, on n'a alors qu'à la dissoudre dans le cyanure de potassium et à ajouter de l'eau distillée ;

2° On peut encore prendre l'azotate d'argent, précipiter par une solution de carbonate de potasse l'argent qu'on redissout dans le cyamure de potassium, et ajouter de l'eau ;

3° On traite l'azotate d'argent par une dissolution concentrée de sel marin ; on obtient un précipité de chlorure qu'on redissout par le cyanure de potassium, et l'on ajoute de l'eau.

Procédé Roseleur. — M. Roseleur indique, de son côté, la formule suivante :

Cyanure d'argent provenant d'argent vierge	250 grammes.
Cyanure de potassium	500 —
Eau	10 litres.

Pour préparer le cyanure d'argent, on fait chauffer dans une capsule de porcelaine :

Argent vierge.	250 grammes.
Acide azotique à 40°.	500 —

On évapore l'excès d'acide jusqu'à fusion de l'azotate d'argent ; ce sel est alors redissout dans 10 à 15 fois son poids d'eau distillée et traité par l'acide cyanhydrique. Il se forme un précipité de cyanure d'argent qui est lavé avec soin. On délaye ce cyanure dans 10 litres d'eau, et on le redissout en y ajoutant du cyanure de potassium.

Il est à remarquer que la présence des matières étrangères dans les bains a quelquefois une grande influence sur la nature des dépôts obtenus. Ainsi un vieux bain d'argent contenant un peu de matière organique donne des dépôts plus adhérents et plus brillants qu'un bain neuf. On vieillit artificiellement les bains en y ajoutant 1 à 2 millièmes d'ammoniaque liquide.

Le dépôt est plus rapide dans une solution d'argent concentrée ; aussi les pièces reçoivent-elles une couche de métal plus épaisse dans le fond du bain qu'à sa surface. Pour obtenir un dépôt plus régulier, il faut agiter les objets dans le bain. Cet effet est souvent produit mécaniquement.

Les anodes sont en argent pur et leur surface doit être à peu près égale à celle des objets à argenter.

La distance entre les pièces et les anodes est d'au moins 10 centimètres. Il ne faut pas attacher les anodes avec du cuivre qui se dissoudrait dans le bain ; on doit employer du fer ou du plomb.

On commence l'opération avec un courant qui ne doit pas dépasser 2 à 3 volts et 50 ampères par mètre carré. Après un quart d'heure de séjour, on retire les pièces pour s'assurer que l'argenture est uniforme ; on les lave dans une solution chaude de cyanure de potassium et on les remet au bain jusqu'à ce que le dépôt ait atteint l'épaisseur voulue.

Le poids d'argent déposé varie de 80 à 100 grammes par douzaine de couverts. L'opération dure environ quatre heures avec une dynamo.

Quand le dépôt est suffisant, les pièces sont lavées à l'eau fraîche, puis à une légère eau seconde d'acide sulfurique. Enfin l'opération se termine par un gratte-bossage et un brunissage.

La couche d'argent déposée par le bain que nous venons de décrire est très adhérente, et la pièce peut être soumise au brunissoir ou au tripoli. L'épaisseur de la couche dépend naturellement de la durée du séjour dans le bain, mais elle ne peut dépasser certaines limites variant de $0^{mm},1$ à 2 millimètres, ce qui correspond à un dépôt de 16 à 320 milligrammes par centimètre carré.

L'inconvénient de ce bain est d'être très vénéneux. En outre, il se forme sur la cathode un précipité de cyanure d'argent basique qui est peu soluble ; on est donc obligé de l'enlever souvent, et toutes les deux ou trois minutes on doit retirer la pièce et la frotter avee une brosse contenant une solution de tartre.

2° *Bain à l'iodure.* M. G. Zinin a imaginé un bain d'argent qui permet d'éviter ces inconvénients. Il est formé d'une dissolution d'iodure d'argent et de potassium avec excès d'iodure de potassium ; voici comment il est préparé :

Dans 1 litre d'eau on dissout 6 gr. 66 d'azotate d'argent, et on y ajoute 500 grammes d'iodure de potassium. Il se forme de l'azotate de potasse qui reste dans la dissolution, et l'iodure d'argent produit se dissout dans l'excès d'iodure de potassium ; l'azotate de potasse ne nuit pas au bain.

L'anode est une plaque d'argent pur ou un alliage de cuivre et d'argent ; l'iode de l'iodure d'argent mis en liberté par l'électrolyse forme avec le cuivre un iodure qui se dissout. L'argent se dépose seul tant que la proportion de cuivre ne dépasse pas celle de l'argent. Quand le cuivre commence à se déposer, on ajoute au bain une dissolution de potasse pour précipiter le cuivre que l'on sépare par filtration.

Le courant doit être très faible et il faut éviter une tension élevée, car il ne doit pas se dégager d'iode libre sur l'anode ; dans ce cas, la quantité d'argent déposée sur la cathode sera

plus considérable que celle qui serait fournie par l'anode ; le dépôt se formerait aux dépens de la solution qui s'appauvrirait. Dans le même but, il est nécessaire que la surface de l'anode soit au moins égale à celle de l'objet à argenter.

L'iode rendu libre doit être neutralisé par une dissolution de potasse qu'on verse goutte à goutte dans le bain, jusqu'à ce qu'il devienne incolore ; l'iode se transforme en iodure de potassium et en iodate de potasse.

L'objet est fortement argenté au bout de dix à trente minutes. Avant de le rincer, il est bon de le soumettre à une dissolution de 1 partie d'iodure de potassium pour 4 parties d'eau, afin d'éviter toute formation d'iodure d'argent, qui du reste est peu à craindre. Le métal déposé est d'un blanc mat, et suffisamment adhérent pour résister au brunissoir.

Avec le bain de cyanure il est très difficile d'obtenir des reproductions en argent; il n'en est pas de même avec celui d'iodure. Le moule en cuivre destiné à recevoir l'argent est mis d'abord dans le bain que nous avons décrit ci-dessus. Quand la couche a une certaine épaisseur, on le place dans un second bain contenant la même proportion d'iodure de potassium, mais saturé d'iodure d'argent, et on l'y laisse le temps nécessaire pour acquérir l'épaisseur voulue.

Quand la couche est assez forte, on dissout le moule en cuivre avec le chlorure de fer.

Les objets en étain, fer, plomb, zinc, etc., pour être argentés, doivent être préalablement recouverts de cuivre, et on peut alors les passer au bain d'argent sans aucun nettoyage. Le maillechort doit être d'abord nickelé, puis cuivré, afin d'obtenir une couche d'argent adhérente.

Pour produire l'adhérence de l'argent, on peut encore amalgamer les objets après les avoir nettoyés. Dans 1 litre d'eau on dissout 0 gr. 5 à 1 gramme d'azotate d'oxydule de mercure, et on y ajoute peu à peu de l'acide azotique en remuant continuellement la liqueur jusqu'à ce qu'elle devienne claire. Les objets en cuivre sont passés d'abord dans ce mélange, et on ne les met au bain d'argent que quand leur surface s'est couverte d'une couche brillante de mercure. Lorsque le dépôt d'argent est terminé, la

pièce est chauffée au rouge sur des charbons dans un fort courant d'air, pour enlever le mercure ; l'opération se termine par un polissage.

Le bain d'iodure coûte plus cher que celui de cyanure, à cause du prix élevé de l'iodure de potassium et de la concentration de la dissolution.

Préparation des objets à argenter. — Avant de faire passer les objets au bain d'argent, on doit les traiter de la manière suivante :

1° Pour le dégraissage, faire bouillir quelques instants les pièces à argenter dans une dissolution contenant 1 kilogramme de potasse pour 10 litres d'eau, et laver ;

2° Décaper dans de l'eau acidulée à un dixième en poids d'acide sulfurique, et laver ;

3° Passer dans un bain formé de :

Acide azotique à 36°	10 kilogrammes.
Sel marin.	200 grammes.
Suie grasse calcinée	200 —

Après un séjour de quelques secondes, laver vivement les pièces à grande eau ;

4° Passer vite dans le mélange suivant, qui doit être préparé au moins depuis la veille :

Acide azotique à 36°	6 kilogrammes.
Acide sulfurique à 66°	8 —
Sel marin.	400 grammes.

Laver à grande eau rapidement ;

5° Jusqu'à ce que les pièces soient bien blanches, ce qui exige quelques secondes, les laisser dans le bain :

Eau	10 litres.
Azotate de bioxyde de mercure	100 grammes.

Acide sulfurique pur en quantité nécessaire pour dissoudre le bioxyde.

Laver à grande eau ;

6° Les pièces sont alors soumises au bain d'argenture.

372. Dorure. — Les bains d'or sont formés avec du cyanure double d'or et de potassium. La première question est

une dissolution d'or ; pour cela, on dissout dans un vase florentin de l'or par de l'eau régale bien pure. On évapore l'acide jusqu'à consistance sirupeuse et l'on dissout à froid le chlorure d'or ainsi obtenu dans de l'eau distillée.

Ce chlorure d'or est ensuite traité de différentes façons, de manière à être transformé en cyanure. Voici deux méthodes indiquées par M. Roseleur : la première, destinée à de grandes pièces, s'emploie à froid ; la seconde sert aux petits objets et nécessite une température élevée.

Procédés Roseleur. — 1° *Dorure à froid.* On prend 100 grammes d'or vierge transformé en chlorure et on les dissout dans 2 litres d'eau. On fait, d'autre part, une solution de 200 grammes de cyanure de potassium dans 8 litres d'eau. On mélange les deux liqueurs et on les fait bouillir pendant une demi-heure.

Ce bain est employé à la température ordinaire. Pour l'entretenir, on y ajoute du cyanure de potassium et du chlorure d'or par parties égales. L'anode est en or. Si le bain est trop riche en or, le dépôt est noirâtre ou rouge foncé ; s'il y a, au contraire, trop de cyanure, le dépôt est gris et l'opération se fait lentement. L'anode, suspendue dans le bain par des fils de platine, doit être retirée dès que l'opération ne marche plus.

2° *Dorure à chaud.* Pour la dorure à chaud, on se sert de bains dont la composition est indiquée ci-dessous, suivant la nature du métal qu'il s'agit de recouvrir :

	Argent, cuivre, alliages riches en cuivre.	Fonte, fer, acier.
Phosphate de soude cristallisé. . .	600 grammes	500 grammes
Bisulfite de soude.	100 —	125 —
Cyanure de potassium.	10 —	5 —
Or vierge transformé en chlorure .	10 —	10 —

On dissout le phosphate à chaud dans 8 litres d'eau, le chlorure d'or dans 1 litre d'eau, et l'on mêle les deux liquides. Puis on dissout le cyanure et le bisulfite dans 1 litre d'eau et l'on ajoute cette dissolution à la première liqueur.

Ce bain s'emploie à la température de 50 à 80°. Il suffit de quelques minutes pour avoir un dépôt d'épaisseur convenable. L'anode est en platine ; peu enfoncée dans le bain, elle donne une

dorure pâle ; très enfoncée, une dorure rouge. Au lieu d'enrichir le bain, il vaut mieux le renouveler quand il ne fonctionne plus.

Procédés Watt. — Voici pour la dorure trois autres formules indiquées par M. Watt :

1° On dissout 2 gr. 33 d'or fin dans de l'eau régale, et l'on évapore l'acide dans une capsule en porcelaine. On redissout la masse dans 30 grammes d'eau et l'on traite par l'ammoniaque. On obtient un précipité que l'on dissout par le cyanure de potassium. On évapore à siccité et l'on dissout ensuite à froid dans l'eau distillée. La liqueur filtrée est additionnée d'eau de manière à former 1 lit. 1.

2° On prend le chlorure d'or fabriqué comme ci-dessus et dissous dans 30 grammes d'eau, et l'on y ajoute une solution concentrée de cyanure de potassium jusqu'à ce que l'or soit précipité. On lave ce précipité et on le dissout avec du cyanure de potassium. Puis on évapore au bain de sable cette dissolution jusqu'à siccité ; on la redissout dans l'eau froide et, pour en former un bain, on y ajoute de l'eau distillée bouillante jusqu'à ce qu'on ait un volume de 1 lit. 1.

3° La dissolution de chlorure d'or, obtenue par l'eau régale comme nous l'avons indiqué, est traitée par le sulfhydrate d'ammoniaque, et le précipité, après un lavage, est dissous par le cyanure de potassium.

Comme l'or a la propriété de se déposer en couche infiniment mince, il suffit de quelques minutes de séjour dans le bain pour donner aux objets une apparence suffisante.

Les bains étant peu résistants, la force électromotrice ne doit pas dépasser 1 volt, et l'intensité par mètre carré de surface à couvrir doit rester inférieure à 10 ampères.

Les objets soumis à la dorure doivent passer par les préparations que nous avons décrites pour l'argenture, c'est-à-dire qu'ils doivent être successivement dégraissés, dérochés et traités par les deux bains de décapage.

373. Platinage. — Le procédé suivant, pour le platinage du cuivre et de ses alliages, est dû à M. Roseleur. On fait

l'eau régale 10 grammes de platine finement laminé, ou plutôt réduit en éponge ; on évapore à siccité et l'on dissout le résidu dans 500 grammes d'eau distillée. On fait ensuite une solution de 100 grammes de phosphate d'ammoniaque dans 500 grammes d'eau, et l'on mélange les deux liqueurs. On obtient un abondant précipité de phosphate ammoniaco-platinique. On y ajoute peu à peu une solution de 500 grammes de phosphate de soude dans 1 litre d'eau. On maintient ce mélange à l'ébullition, en remplaçant l'eau évaporée, jusqu'à ce que, l'ammoniaque s'étant dégagée, la solution soit acide ; à ce moment, la liqueur qui était jaune devient incolore. Ce bain doit être employé à chaud avec un courant très énergique, et il faut avoir soin de l'entretenir au même degré de saturation par l'addition du précipité de phosphate ammoniaco-platinique.

Un autre procédé usité en Amérique consiste à faire une dissolution de platine comme nous l'avons indiqué plus haut ; puis on ajoute à la liqueur un excès de cyanure de potassium. Le courant doit être modéré, sinon le platine se dépose en poudre noire.

Quel que soit le système adopté, l'anode est en platine.

374. Dépôt de l'aluminium. — Pour composer un bain électrolytique d'aluminium, on peut employer le procédé suivant dû à M. Herman Reinbold. On fait dissoudre 50 parties d'alun cristallisé (sulfate double d'alumine et de potasse) dans 300 parties d'eau, et l'on ajoute 10 parties de chlorure d'aluminium. On chauffe jusqu'à 75°, on agite et on laisse refroidir. L'objet à recouvrir est placé au pôle négatif; on met une plaque d'aluminium au pôle positif. Il faut un courant très faible pour que le dépôt soit bon.

375. Nickelage. — Le nickelage est employé surtout pour le cuivre, le bronze, le maillechort, le fer, l'acier et la fonte.

Les bains de nickel sont généralement formés de sels doubles d'ammoniaque et de nickel. Voici les formules les plus usitées :

1° M. Roseleur emploie :

Eau distillée.	10 litres.
Sulfate double de nickel et d'ammoniaque.	400 grammes
Carbonate d'ammoniaque, environ.	300 —

Le sulfate double et le carbonate sont dissous séparément dans l'eau chaude, et l'on verse peu à peu la solution de carbonate jusqu'à la neutralisation de la liqueur, que l'on reconnaît avec le papier de tournesol.

2° M. Gaiffe compose ses bains de nickel de la façon suivante :

Eau distillée	10 litres
Sulfate double de nickel et d'ammoniaque.	1 kilogramme.

Le sulfate est dissous dans l'eau chaude et la liqueur est filtrée après refroidissement.

3° M. Adams se sert de chlorure double de nickel et d'ammonium. Il dissout 135 grammes de nickel dans l'acide chlorhydrique, en évitant l'excès d'acide et chauffant doucement ; il ajoute $2^{lit},25$ d'eau froide, et verse peu à peu de l'ammoniaque jusqu'à neutralisation de la liqueur. Puis, il fait une solution de 70 grammes de sel ammoniac dans l'eau, qu'il mélange à la dissolution de nickel. Enfin, il ajoute de l'eau jusqu'à 10 litres.

4° M. Adams emploie aussi la composition suivante :

On dissout 135 grammes de nickel pur dans l'acide sulfurique additionné de deux fois son poids d'eau, et l'on chauffe jusqu'à dissolution complète. On ajoute de l'eau et on neutralise avec de l'ammoniaque.

On fait une dissolution de 70 grammes de carbonate d'ammoniaque qu'on neutralise par l'acide sulfurique ; on mélange les deux liqueurs et l'on ajoute de l'eau jusqu'à ce qu'on ait un volume de 10 litres. Il faut avoir soin de filtrer et décanter les dissolutions.

5° D'après M. Edward Weston, en ajoutant à une solution ordinaire de nickel de l'acide borique libre ou combiné, on évite la formation de sous-sels sur la cathode ; le dépôt est plus fin, il est blanc éclatant, et le bain se conserve indéfiniment.

On a ainsi de bons bains avec 5 parties de chlorure de nickel pour 2 parties d'acide borique, ou 3 parties de sulfate de nickel pour 1 partie d'acide borique.

Suivant le même auteur, les bains seraient rendus encore meilleurs par l'addition d'un alcali, de façon à redissoudre le précipité formé dans la liqueur. On peut même ajouter avec avantage un

peu d'acide borique aux solutions de chlorures doubles de nickel et de magnésium, sodium ou calcium, ainsi qu'à toute solution de chlorure ou de sulfate de nickel avec des sulfates alcalins ou alcalino-terreux.

D'après M. Weston, le borate de nickel, quoique insoluble dans l'eau, est très soluble dans les solutions d'un grand nombre de sels de nickel, et l'on obtient en galvanoplastie de bons résultats avec des bains formés de borate et d'un sel de nickel.

6° Voici une nouvelle formule de nickelage, essayée actuellement dans plusieurs ateliers du Hainaut, qui permet de déposer avec adhérence, en peu de temps et avec un courant électrique relativement faible, une forte épaisseur de nickel sur tous les métaux.

Sulfate de nickel pur	1 kilogramme.
Tartrate d'ammoniaque neutre.	0,725
Acide tannique à l'éther.	0,005
Eau.	20 litres.

Le tartrate neutre d'ammoniaque s'obtient en saturant une dissolution d'acide tartrique par de l'ammoniaque. Le sulfate de nickel, lui aussi, doit être neutralisé avec soin. Cela fait, on dissout le tout dans 3 ou 4 litres d'eau et on fait bouillir pendant un quart d'heure environ ; on ajoute ensuite le complément d'eau pour faire 20 litres et on filtre ou l'on décante.

Le dépôt obtenu est très blanc, doux, homogène, et, quoique pouvant donner une très forte épaisseur, il ne laisse pas de rugosités à la surface et n'écaille pas, si les pièces ont été bien décapées. On a obtenu par ce procédé de forts dépôts de nickel sur de la fonte brute ou polie, à un prix de revient ne dépassant guère celui du cuivrage.

Manières de procéder. — Quel que soit le bain que l'on emploie, il faut avoir bien soin de le conserver toujours dans une neutralité parfaite. Un bain trop alcalin donne un dépôt jaunâtre ; s'il est trop acide, le métal adhère mal et se boursoufle.

La solution doit marquer en moyenne 6 à 8 degrés à l'aréomètre de Baumé. Si elle est moins concentrée, le dépôt est trop lent. Si elle dépasse 10 degrés, les sels de nickel cristallisent sur

les anodes. Les bains sont maintenus à l'état de concentration par l'addition de cristaux des sels entrant dans leur composition.

La pureté des réactifs et de l'eau a une très grande importance sur la nature des dépôts; aussi ne saurait-on y veiller avec trop d'attention. Il ne faut pas employer l'eau des rivières ni des sources, mais seulement de l'eau distillée ou de pluie.

Avant de passer au nickelage, toutes les pièces doivent être nettoyées avec le plus grand soin ; il faut même les polir préalablement, si l'on veut avoir des dépôts bien brillants. Le polissage se fait d'abord avec un cylindre revêtu de cuir et du sable très fin, ou avec une petite meule d'émeri; l'opération est terminée avec de la chaux vive en poudre très fine.

Le dégraissage est opéré dans une solution bouillante de potasse contenant 10 litres d'eau pour 1 kilogramme de potasse d'Amérique. On peut encore frotter les pièces avec une brosse trempée dans une bouillie chaude de blanc d'Espagne, d'eau et de carbonate de soude. Pour enlever la graisse, on se sert aussi de la benzine.

La composition des bains de décapage varie avec la nature du métal à nickeler. Pour le cuivre et ses alliages, on se sert d'une solution contenant 1 kilogramme d'acide azotique et 10 litres d'eau. Pour obtenir un décapage complet et enlever les moindres parcelles d'oxyde qui ont pu se déposer sur le cuivre, après son nettoyage, on fait usage d'un bain de cyanure formé de 500 grammes de cyanure de potassium pour 10 litres d'eau.

Pour décaper le fer et la fonte, on emploie un mélange de 100 grammes d'acide sulfurique et de 10 litres d'eau ; après un rinçage à l'eau, les pièces sont frottées avec de la poudre de pierre ponce; puis elles sont plongées dans un bain d'acide chlorhydrique contenant une partie d'acide pour 5 parties d'eau en volume, afin d'enlever les moindres traces d'oxyde qui pourraient rester sur le fer. Les objets en fer doivent être mis au bain de nickel aussitôt après le nettoyage, pour éviter la formation d'oxyde s'ils restaient exposés à l'air quelques instants.

Le fer peut être nickelé directement; mais il est préférable de le recouvrir préalablement d'une légère couche de cuivre ; on emploie pour cela un des bains décrits plus loin pour le cuivrage du fer.

Comme le zinc se dissout très facilement dans les solutions ordinairement employées pour les bains de nickel, il faut éviter absolument qu'il y soit plongé à nu et il doit être revêtu préalablement d'une forte couche de cuivre.

Au lieu de cuivrer le zinc, M. Meidinger le recouvre d'une légère couche de mercure. L'amalgamation produit le même effet que le cuivrage et permet d'obtenir le nickelage du zinc sans qu'on s'expose à dissoudre ce métal dans le bain.

Au sortir du bain, les objets nickelés doivent être lavés à grande eau, d'abord dans une cuve d'eau froide, puis dans de l'eau chaude ; ensuite on les sèche dans de la sciure de bois chaude. Le polissage se fait d'abord avec de la bouillie de craie et des brosses animées d'une grande vitesse de rotation ; on se sert ensuite de disques de feutre sur lesquels on répand de la chaux en poudre très fine, et l'on finit par des disques de laine.

Les anodes sont en nickel chimiquement pur ; elles sont suspendues par des fils de nickel terminés en crochet. Leur surface doit être beaucoup plus grande que celle du métal soumis au bain, parce que les solutions généralement employées dissolvent difficilement le nickel : il faut donc que la surface des anodes soit assez grande pour parer à cet inconvénient.

La force électromotrice nécessaire varie suivant les différentes phases de l'opération. M. Sprague conseille d'employer 5 volts au commencement et de finir par 1 volt. C'est que le nickelage est toujours accompagné d'un fort dégagement d'hydrogène, qu'il faut réduire autant que possible, pour ne pas dépenser du travail inutilement et parce que le dépôt fait dans ces conditions devient poreux. On doit donc dès le début opérer avec une force assez grande pour recouvrir au plus vite toute la pièce à nickeler ; lorsque le dépôt a pris une certaine épaisseur, quand toute la surface est blanchie, il faut modérer la source électrique pour éviter l'inconvénient résultant de la production du gaz. Au début, l'intensité doit être de 1,5 ampère par décimètre carré ; elle descend ensuite à 0,3 ou 0,15 ampère.

Les pièces placées dans les bains doivent être remuées très souvent, parce que la richesse de la dissolution n'est pas uniforme dans toute la cuve ; elle varie en chaque point suivant la quantité

d'électricité qui y a passé. Quand une pièce est restée longtemps à la même place, le bain qui l'entoure est nécessairement appauvri.

Comme le courant a une grande tendance à se porter sur les parties saillantes, il est très utile de changer le plus souvent possible les positions relatives des anodes et des pièces, afin d'obtenir une répartition plus uniforme.

Nous avons déjà fait ces observations à propos de l'argenture ; on peut les appliquer à tous les bains de galvanoplastie.

376. Nickelage des rouleaux d'impression. — Le nickelage des rouleaux d'impression a l'avantage de rendre leur surface plus unie et plus dure que lorsqu'ils sont simplement en cuivre ou en laiton, et, par suite, de diminuer l'usure de la gravure. Il permet aussi d'éviter l'accident désigné par les imprimeurs sous le nom de *fardage*. Voici quelques renseignements sur cette application, donnés par M. Lalance à la Société industrielle de Mulhouse.

Les rouleaux sont gravés comme d'habitude ; ils peuvent être nickelés soit au sortir de la gravure, soit après avoir déjà imprimé. Mais, dans les deux cas, il faut les nettoyer avec le plus grand soin ; on emploie pour cela la térébenthine, des acides étendus et de la potasse chaude, enfin du cyanure de potassium à 10°. Pendant ces diverses opérations, les parties métalliques à recouvrir ne doivent jamais sécher, sans quoi le dépôt ne se produirait pas.

Après avoir lavé à l'eau froide, on amène le rouleau dans un bain formé de 57 kilogrammes de sulfate double de nickel et d'ammoniaque et de 2 kilogrammes de chlorure de sodium dissous dans 680 litres d'eau. Les anodes en nickel sont suspendues parallèlement au rouleau.

Les bains neufs ne fonctionnent jamais bien, il faut les faire traverser pendant quelque temps par le courant électrique pour obtenir un dépôt satisfaisant. Le bain doit être légèrement acide ; s'il est alcalin ou trop acide, le dépôt est noir ou prend un aspect cristallin et manque de solidité. L'intensité du courant doit être de 1 ampère par décimètre carré de surface à nickeler.

On remue le rouleau pendant l'opération, et on frotte avec une brosse pour le nettoyer et en chasser les bulles d'hydrogène qui viennent se dégager à sa surface. Le nickelage, une fois commencé,

ne peut être interrompu, sans quoi la couche déposée se détache. L'électrolyse dure une heure et demie environ.

Ce procédé est employé assez largement en Angleterre, où il donne de bons résultats. Il a été installé aussi à Pfastatt, dans l'usine de MM. Schaeffer, Lalance et Cie, qui s'en déclarent satisfaits et n'hésitent pas à le recommander aux imprimeurs.

377. Dépôt de cobalt — Le cobalt peut être substitué au nickel pour recouvrir le laiton, le cuivre, etc. Il est moins dur que le nickel ; mais le dépôt se fait très facilement, et un faible courant suffit. Le bain que l'on emploie est composé d'un sulfate double de cobalt et d'ammoniaque.

On fait dissoudre 31 grammes de ce sel par litre d'eau ; le liquide a une densité de 1,015 à 15°. Il faut une tension de 2 volts. Les anodes sont formées de plaques de cobalt laminé ayant 5 centimètres de large sur 18 à 25 centimètres de longueur, suivant le volume du bain, et on les espace d'environ 9 à 10 centimètres.

La surface relative des anodes et des cathodes a une grande importance ; pour obtenir un bon dépôt il faut que l'anode ait à peu près le tiers de la surface de l'objet à recouvrir.

Le dépôt peut se faire sur le cuivre, le laiton, le fer, l'acier; les opérations sont les mêmes que pour le nickelage.

Quand on met l'objet au bain, on doit régler le courant de façon qu'une couche mince se dépose en quelques secondes : ensuite il faut diminuer l'intensité ; sinon le dépôt noircit sur quelques points. Quand on opère sur le cuivre, on emploie pour commencer un courant un peu plus intense qu'avec le laiton, et on le diminue au bout de quelques instants quand l'objet a été complètement couvert.

Pour avoir un dépôt mat, après que l'objet a reçu la première couche, on le retire, on le frotte avec de la pierre ponce ou de la brique pilée et après une lavage on le remet au bain avec un courant plus fort qu'on réduit ensuite.

Pour obtenir le brillant, on se sert de brosses en fil d'acier humectées de bière et montées sur un tour ; on trempe ensuite l'objet dans du cyanure de potassium, on rince à l'eau bouillante et on fait sécher dans de la sciure de bois.

Un faible courant suffit pour les objets en fer et en acier ; un

seul élément Daniell est nécessaire. Pour la fonte il faut un courant plus fort.

Quand on dépose plusieurs couches successives de nickel sur un même objet, l'adhérence n'est jamais complète, et les diverses couches se séparent l'une de l'autre. Le même fait ne se produit pas avec le cobalt.

La densité du bain doit être maintenue d'une manière constante à 1,015 ; on compense le liquide évaporé par une addition d'eau ; mais il ne faut pas étendre la liqueur au delà de cette limite, car on s'exposerait à avoir des taches.

On n'a pas encore obtenu de dépôts adhérents de cobalt sur le zinc.

Le cobalt ne convient pas pour les ustensiles de cuisine ; il est attaqué par le vinaigre, les acides et certains légumes. Sauf cette exception, il peut recevoir les mêmes applications que le nickel.

378. Étamage. — On obtient un bain d'étamage en prenant une dissolution de :

Pyrophosphate de soude.	5 kilogrammes
Eau.	500 litres.

Dans cette liqueur on fait dissoudre 500 grammes de protochlorure d'étain fondu ; il faut avoir soin de placer ce sel dans un tamis qu'on agite souvent, afin que les fragments qui peuvent tomber au fond ne s'entourent pas d'une croûte peu soluble qui arrêterait la dissolution.

L'anode est en étain ; on doit entretenir le bain en ajoutant, avec le tamis, parties égales de pyrophosphate de soude et de sel d'étain.

M. Birgham emploie le procédé suivant : On dissout de l'étain dans de l'acide chlorhydrique et on le précipite par la potasse. Puis on mélange le précipité avec une dissolution de cyanure de potassium et de potasse caustique. On obtient ainsi un bain qui peut servir à étamer tous les métaux.

379. Aciérage des planches de cuivre gravées. — Pour augmenter

la résistance des planches de cuivre gravées, on revêt quelquefois leur surface d'une mince couche de fer obtenue comme il suit :

Dans une dissolution contenant 20 grammes de sel ammoniac pour 100 grammes d'eau, on suspend deux plaques de fer au bois attachées aux pôles d'une forte pile. Au bout de quelques heures, on a une dissolution de fer.

La planche à recouvrir, reliée au pôle négatif, est ensuite plongée dans ce bain, après avoir été bien nettoyée et frottée avec de la potasse caustique.

La force électromotrice est d'environ 4 volts. Les clichés, après l'aciérage, sont lavés à l'eau froide, puis frottés avec de la benzine. Pour les conserver, on doit les recouvrir d'un peu de cire fondue.

380. Dépôt du fer. — On a essayé, dans quelques hôtels de monnaies, d'employer des dépôts électrolytiques de fer pour reproduire les clichés de billets de banque ; on pourrait s'en servir encore dans la reproduction des coins pour médailles et monnaies. Le dépôt de fer offre du reste de grandes difficultés. Voici un procédé indiqué par le professeur Robert Austin à l'*Iron Institute*.

Le bain est composé d'une solution de sulfate de fer et de sulfate de magnésie en proportions équivalentes et présentant un poids spécifique de 1,155. La solution est neutralisée en ajoutant du carbonate de magnésie jusqu'à ce que le papier de tournesol indique une faible trace d'acide. L'anode est en fer forgé et a à peu près les dimensions de l'objet à recouvrir ; les électrodes sont écartées de 4 centimètres. On doit faire usage de courants très faibles ; ainsi l'inventeur a obtenu les meilleurs résultats pour une surface de 560^{cm^2} avec un courant de 0,089 ampère. La source électrique était formée par deux éléments Smee groupés en tension et ayant chacun une électrode en argent de 50^{cm^2} de surface.

L'opération est très lente.

Pour empêcher le dépôt de fer d'adhérer au cuivre du moule, on recouvre celui-ci d'une légère couche de nickel, qui est exposée quelque temps à l'air afin d'en ternir la surface. Puis on applique une seconde couche de nickel sur laquelle se fait le dépôt de fer. Malgré cet artifice, il se produit encore quelquefois des adhérences

entre le fer et le cuivre, et l'inventeur a essayé de recouvrir le cuivre d'une couche mince d'iodure d'argent qui est très conducteur.

381. Electrotypie. — Voici quelques détails sur la fabrication par électrolyse des plaques de cuivre servant à reproduire les matrices des gravures, telle qu'elle est pratiquée aux ateliers de l'*Ordnance Survey*, de Southampton. Ces plaques, destinées à la gravure si détaillée et si fine des cartes, exigent des conditions toutes spéciales :

Des dimensions considérables $0^m,69$ de largeur sur $0^m,98$ de longueur ; des épaisseurs présentant $1^{mm},56$ pour les matrices et $3^{mm},19$ pour les doubles. L'égalité d'épaisseur doit être parfaite pour les doubles. Cette condition est indispensable pour éviter les défauts d'impression produits par les moindres différences d'épaisseur. Enfin il est nécessaire, pour le travail des corrections, que le grain du cuivre soit très souple.

Voici comment ces conditions sont remplies :

La plaque de réception destinée à être reproduite est d'abord nettoyée avec une solution de potasse ; on la chauffe ensuite, et l'on recouvre de cire la face postérieure. La seconde face, qui comporte la gravure, est enduite d'une solution de cyanure d'argent ; puis on la brosse avec de la teinture d'iode. Il se forme une couche d'iodure d'argent qui sert à empêcher l'adhérence entre la plaque de réception et le métal électrolysé formant le *double*.

La plaque de réception, après cette opération, est fixée à un châssis ; ses coins sont recouverts d'un enduit qui les protège contre le dépôt de cuivre ; cet enduit est formé de plâtre de Paris, cire d'abeille, colophane et suif de Russie. Le plâtre a pour but d'augmenter la densité du mélange, afin que, si quelques parcelles de l'enduit se détachent, elles ne flottent pas dans le bain et ne s'incorporent pas dans le dépôt cuivreux.

Pour obtenir une épaisseur uniforme de la plaque, il faut que le châssis soit bien horizontal et qu'aucun corps étranger ne vienne se loger dans le dépôt. Les bacs sont peu profonds. L'anode est disposée au fond, à $0^m,025$ environ de la plaque de réception : cette distance est maintenue par des taquets en bois portés par le châssis.

Le bain est formé d'une solution de sulfate de cuivre contenant en volume 5 p. 100 d'acide libre : la densité de la solution est de 1,15. Le liquide doit toujours être en mouvement, ce qu'on obtient par l'oscillation du bac qui est monté sur un axe longitudinal. Ce mouvement a pour but d'empêcher la dissolution de s'appauvrir dans le voisinage de l'anode qui se couvrirait alors de cristaux de sulfate. En outre, dans un bain au repos, la dissolution est diluée près de la plaque de réception, et du cuivre amaigri peut se précipiter. Enfin le mouvement empêche la polarisation.

Il existe dans l'atelier 23 bacs réunis en série.

Pour obtenir un bon dépôt, le courant ne doit pas avoir plus de 0,66 ampère par décimètre carré. Il est réglé à raison de 0,5 ampère par décimètre carré pour les plaques présentant $0^m,67$ sur $0^m,98$. Pour les plaques de $0^m,37$ sur $0^m,57$, que l'on dispose au nombre de deux dans le même châssis, on place un shunt sur les bornes du bac, de façon à obtenir 0,65 ampère par décimètre carré. La moyenne du courant fourni est de 35 ampères.

La résistance de chaque bain est 0,009 ohm, et la différence de potentiel qu'il nécessite est de 0,02 volt.

La force électromotrice nécessaire pour obtenir 35 ampères est $23 \times 0,02 + (0,009 \times 23 \times 35) = 7,9$ volts. Il faut ajouter à ce chiffre 2,5 volts pour les conducteurs ; la dynamo doit donc fournir 10 volts à ses bornes.

382. Cuivrage. — Les bains de cuivre sont formés d'une dissolution de sulfate de cuivre à laquelle on ajoute de l'acide sulfurique, afin de rendre le liquide conducteur. Pour préparer ce bain, on fait un mélange d'eau et d'acide sulfurique, dans la proportion de 10 p. 100 environ en volume, et dans cette eau acidulée on fait dissoudre du sulfate de cuivre presque jusqu'à saturation. Ce bain doit marquer 25° Baumé ; on l'emploie à froid et on l'entretient en ajoutant des cristaux de sulfate de cuivre ; mais il faut éviter avec grand soin qu'il soit complètement saturé de sulfate, car alors il se forme sur les anodes des cristaux qui empêchent le passage du courant. Le liquide doit être contenu dans des vases en verre, en porcelaine ou en gutta-percha. Pour les grands bains, on emploie des cuves en bois recouvertes de plomb ou de gutta.

Ce bain acide de cuivre ne peut être employé quand l'objet à cuivrer est oxydable, avec une pièce en fer ou en zinc par exemple. Il faut alors recourir à une autre composition.

Pour avoir un bon dépôt de cuivre, d'après M. Fontaine, on ne doit pas dépasser en pratique une intensité de 1 ampère par décimètre carré; la tension varie de 0,5 à 1,5 volt.

Cuivrage du zinc. — 1° Les formules suivantes ont été indiquées par M. Roseleur pour les bains destinés au cuivrage du zinc : on doit prendre l'une ou l'autre de ces deux compositions, suivant que les pièces sont de grande ou de petite dimension.

	Grosses pièces.	Petites pièces.
Eau	25 litres	25 litres
Bisulfite de soude	300 grammes	100 grammes
Cyanure de potassium	500 —	700 —
Acétate de cuivre	350 —	450 —
Ammoniaque	200 —	150 —

2° M. Watt indique la recette suivante :

On dissout 230 grammes de sulfate de cuivre dans 1 litre d'eau chaude. Quand la dissolution est froide, on y ajoute peu à peu de l'ammoniaque, jusqu'à ce qu'on obtienne une liqueur bleue bien claire. On verse alors une dissolution concentrée de cyanure de potassium jusqu'à disparition de la couleur bleue. Le bain doit être employé à 50 ou 55°.

Avant de passer au bain, les pièces de zinc sont décapées dans un mélange de 450 grammes d'acide sulfurique pour 10 litres d'eau et ensuite dans un bain alcalin.

Laitonage du zinc. — Pour obtenir un bain destiné au laitonage des petites pièces de zinc, on fait deux dissolutions : la première contenant :

Eau	20 litres
Bisulfite de soude	700 grammes
Cyanure de potassium à 70 p. 100	1 000 —

La seconde solution formée de :

Eau	5 litres
Acétate de cuivre	350 grammes
Protochlorure de zinc	350 —
Ammoniaque	400 —

On mélange ensuite les deux dissolutions et l'on filtre. L'anode doit être en laiton.

Laitonage du fer, de la fonte et de l'acier. — On prépare deux dissolutions :

Eau ordinaire	8 litres
Bisulfite de soude	200 grammes
Cyanure de potassium à 70 p. 100.	500 —
Carbonate de soude	1 000 —

La seconde comprend :

Eau ordinaire	2 litres
Acétate de cuivre	125 grammes
Protochlorure de zinc neutre	100 —

On mélange les deux liqueurs pour former le bain de laiton.

L'intensité du courant influe beaucoup sur la couleur du dépôt. Un courant faible donne un dépôt rouge ; s'il est trop fort, le dépôt est blanc. Quand le dépôt est trop rouge, on ajoute dans le bain du sel de zinc, ou bien on remplace momentanément l'anode de laiton par du zinc. Si le dépôt est trop blanc, on augmente la richesse du bain en cuivre, ou bien on remplace pour quelque temps l'anode de laiton par du cuivre rouge. La tension varie de 3 à 4 volts ; l'intensité est de 0,4 à 0,5 ampère par décimètre carré.

383. Cuivrage du fer et de la fonte. — Le cuivrage est fort en usage depuis quelques années pour le fer et la fonte. Ces métaux s'oxydent en effet très facilement et ont besoin d'être protégés contre les actions atmosphériques. On avait autrefois recours à d'épaisses couches de peinture, mais ce procédé donne un résultat qui n'a rien d'artistique. On s'est alors adressé au cuivrage et les tentatives dans ce sens ont été fort nombreuses.

Il existe actuellement deux systèmes de cuivrage, reposant sur des principes absolument différents. L'un d'eux, analogue à ceux que nous avons décrits précédemment pour la dorure, l'argenture, le nickelage, applique directement le cuivre sur le fer sans interposition d'aucun corps étranger ; l'adhérence des deux métaux est

complète. Par l'autre procédé, le fer et le cuivre ne sont que juxtaposés ; on place entre eux une couche de vernis qui les isole l'un de l'autre; ce dernier procédé a été inventé par M. Oudry, et voici les raisons sur lesquelles il s'appuie.

Quand on met du fer et du cuivre en contact dans une atmosphère humide, le fer est attaqué très vivement et se détruit beaucoup plus vite que s'il était exposé seul à une action oxydante. C'est qu'en juxtaposant ces deux métaux, on forme un élément de pile, dans lequel le cuivre est le pôle positif et le fer le pôle négatif. L'eau de l'atmosphère est décomposée et son oxygène, en venant se fixer sur le fer, l'attaque d'une façon continue. L'effet de la pile vient ainsi s'ajouter à l'action destructive de l'air. C'est pour cette raison que, sur les navires, on évite avec le plus grand soin de mettre en contact ces deux métaux. Dans l'eau salée, et en présence du cuivre, le fer est détruit avec une rapidité incroyable.

Aussi, quand à la surface d'une pièce en fer cuivré, il se produit une petite déchirure dans la couche de cuivre, le mal s'étend-il en très peu de temps.

1° *Procédé Oudry.*— Pour éviter cet inconvénient, M. Oudry a eu l'idée de séparer complètement les deux métaux. Le fer destiné au cuivrage est recouvert d'abord de peinture au minium, puis d'une couche d'un vernis résineux très résistant, que l'on fait sécher à l'étuve. La surface est alors enduite de plombagine, qui lui donne la conductibilité électrique, et c'est dans cet état que la pièce est plongée dans un bain et recouverte d'une couche de cuivre. Le bain est formé de sulfate de cuivre et contient environ 10 p. 100 d'acide sulfurique libre. Il est composé comme nous l'avons indiqué § 382.

C'est ainsi qu'ont été fabriqués presque tous les candélabres de la ville de Paris, les fontaines de la place Louvois et de la place de la Concorde. Ce système préserve le fer de l'oxydation, mais il a l'inconvénient d'empâter les détails de la sculpture. Les couches superposées de peinture, de vernis et de cuivre enlèvent aux objets cuivrés leur caractère artistique, qui consiste surtout dans la netteté des arêtes. Ce défaut a été, il est vrai, un peu atténué

depuis quelque temps : les pièces de fonte sont simplement plongées dans une peinture formée d'huile chaude et de poudre de cuivre; après avoir été séchés à l'étuve, les objets passent au bain de cuivre.

Un autre défaut de ce système, c'est que la couche de cuivre, reposant sur un vernis qui n'est pas dur, n'a pas elle-même une grande solidité. On est obligé de lui donner au moins un demi-millimètre d'épaisseur et même 1 millimètre dans les parties saillantes. Malgré cela, elle se déchire facilement et exige des réparations continuelles. Ces réparations se font avec une espèce d'enduit formé de résine, de copal et de cuivre en poudre, qu'on applique avec un fer chaud sur les points défectueux.

Le procédé Oudry est difficilement applicable aux pièces de haut relief; avec les objets très refouillés, il est presque impossible. Pour être pratique, il exige des modèles en fonte spéciaux de dépouille très facile, comme les candélabres de la ville de Paris.

2° *Cuivrage adhérent du fer et de la fonte.* — Le second procédé de cuivrage, qui repose sur l'adhérence absolue des deux métaux, n'a pas ces inconvénients. Il se prête très facilement à toutes les exigences de la sculpture et permet de traiter les pièces les plus compliquées.

On peut former un bain de cuivrage adhérent de plusieurs façons. Pour les petits objets en fer et en acier, on se sert d'un bain neutre de cyanure double de cuivre et de potassium. On l'obtient en faisant bouillir de l'oxyde de cuivre dans du cyanure de potassium, ou en agissant au moyen de l'électricité sur une plaque de cuivre fixée au pôle positif d'une pile et plongée dans une dissolution de cyanure de potassium.

Chaque fois qu'on veut dorer ou argenter une pièce de fer, il est bon de déposer préalablement à sa surface une légère couche de cuivre, en la plongeant dans le bain indiqué précédemment et la soumettant un instant à l'action du courant électrique.

Le bain de cyanure de cuivre et de potassium coûte fort cher. Aussi ne faut-il pas songer à l'employer pour cuivrer des pièces importantes en fer ou en fonte.

Procédé Weil. — Le procédé Weil, qui peut s'appliquer à des objets de grande dimension, repose sur l'emploi d'une liqueur alcaline : c'est un tartrate double de cuivre et de potasse avec excès de potasse. Le tartrate de cuivre seul est peu soluble dans l'eau, l'excès d'alcali a pour but de donner à ce sel une plus grande solubilité et d'augmenter la conductibilité du bain. En outre, la liqueur, étant alcaline, protège le fer de toute attaque qui rendrait impossible l'adhérence du cuivre.

L'inconvénient de ce système est la difficulté qu'il y a à entretenir les pièces de fer en bon état de décapage, Le tartrate double de cuivre et de potasse, bien qu'il dissolve l'oxyde de fer, n'a pas un pouvoir assez décapant, et il est bien difficile d'empêcher la formation d'oxyde de fer sur quelques points de la surface des pièces exposées au bain. Il résulte de là des défauts d'adhérence entre le fer et le cuivre.

Procédé Gauduin. — Contrairement à M. Weil, M. Gauduin se sert d'un bain acide, formé d'un oxalate double de cuivre et d'un alcali avec grand excès d'acide oxalique. En voici la raison : l'acide oxalique dissout avec une grande facilité les oxydes de fer, sans décomposer l'eau du bain, comme le ferait l'acide sulfurique, par exemple. Une surface de fer couverte d'oxyde sort parfaitement nette après un séjour de quelques minutes dans une dissolution d'acide oxalique, sans donner naissance à aucun gaz. Le rôle de cet acide est donc parfaitement indiqué pour la formation d'un bain galvanique. Il décape la surface du fer, en même temps qu'il sert à former la dissolution cuivreuse.

En outre, parmi les acides organiques, les acides oxalique et mellitique sont les seuls qui, dans leurs combinaisons salines, ne contiennent pas d'hydrogène. La formule de l'oxalate de cuivre est C^2O^3CuO. L'acétate de cuivre au contraire est représenté par $C^4H^3O^3$ CuO. Il résulte de là que, quand on électrolyse un oxalate de cuivre, il n'y a pas dégagement de gaz au pôle négatif, tandis qu'avec un acétate on a un dégagement d'hydrogène en même temps qu'un dépôt de cuivre. C'est un grand inconvénient en galvanoplastie, où l'on recherche avant tout des dépôts brillants. Quand il y a formation de gaz, le dépôt est rugueux et peu adhérent.

L'alcali employé par M. Gauduin a d'abord été la soude; le bain était donc formé d'un oxalate acide de cuivre et de soude. Mais ce sel étant très peu soluble dans l'eau, l'opération exigeait une température de 50 à 60 degrés et nécessitait un outillage fort dispendieux. La liqueur, contenue dans une cuve en cuivre, était chauffée au bain-marie dans une seconde cuve de tôle placée directement sur le foyer. Malgré ces précautions, le dépôt de cuivre était très lent, parce que l'oxalate de cuivre et de soude est très peu soluble, même à chaud. Le bain était donc trop pauvre et trop peu conducteur. Pour marcher un peu vite, il fallait forcer la tension du courant, ce qui entraînait parfois des dégagements de gaz fort nuisibles, dus à la décomposition de l'eau. En outre, les anodes se couvraient facilement d'une couche d'oxalate qui ne se dissolvait pas et arrêtait l'opération.

Un autre inconvénient des bains chauds est la difficulté de faire des *réserves*. Quand toutes les parties d'une statue n'ont pas été recouvertes de cuivre du premier coup, il est nécessaire d'enduire les portions cuivrées d'un vernis isolant et de plonger l'objet une seconde fois dans le bain. Le courant se porte alors sur les points qui n'avaient pas été recouverts. Les vernis dont on se sert ordinairement se ramollissent à la température du bain et ne résistent pas à l'influence combinée de la chaleur et de l'acide. Cette considération est très importante pour le cuivrage des statues, parce qu'elles présentent toujours des formes très compliquées, des parties saillantes sur lesquelles le cuivre se dépose en excès, et des creux où il ne peut pas pénétrer. C'est seulement par des réserves qu'il est possible de rendre la couche de métal uniforme. Quand le bain est bon conducteur, cet inconvénient est moindre, et on le diminue en plaçant les anodes à grande distance de la statue; l'influence des parties saillantes se trouve ainsi amoindrie.

Si nous insistons sur ce point, c'est afin de bien montrer les difficultés auxquelles on s'expose en opérant sur des sels peu solubles. Avec des bains pauvres on a nécessairement un dépôt très lent, et si l'on force la production d'électricité, on a des dégagements gazeux.

M. Cadiat a apporté au procédé de M. Gauduin une importante modification qui a fait disparaître tous ces inconvénients. Se fon-

dant sur la grande solubilité des sels de cuivre dans l'ammoniaque, il a remplacé la soude par cet alcali. Dès lors on a pu opérer avec un bain froid; la solution étant riche en cuivre, le dépôt se fait très rapidement. On évite l'encrassement des anodes, sur lesquelles on ne voit plus se former de dépôts insolubles. Les cuves sont construites en maçonnerie enduite de ciment, ce qui permet de leur donner à peu de frais des proportions très considérables. D'ailleurs, l'oxalate de chaux étant absolument insoluble dans l'eau, on n'a pas à craindre que la maçonnerie soit attaquée par le liquide qu'elle renferme. Il existe dans l'atelier du Val-d'Osne une cuve ayant une capacité d'environ 18 mètres cubes.

La liqueur du bain est un oxalate double de cuivre et d'ammoniaque avec grand excès d'acide. Pour la former, on dissout du sulfate de cuivre dans l'eau et on précipite par le carbonate de soude. Après un lavage qui doit être fait avec grand soin, pour chasser toutes les traces d'acide sulfurique, le précipité est repris par de l'eau de pluie et on y verse une dissolution d'acide oxalique. Puis on ajoute peu à peu de l'ammoniaque jusqu'à ce que la liqueur s'éclaircisse complètement et prenne une belle couleur bleue. Il ne faut pas dépasser cette limite, parce que le bain deviendrait alcalin; aussi doit-on essayer continuellement la liqueur avec le papier de tournesol.

En combinant les réactifs dans les proportions suivantes, on évite tous les tâtonnements et l'on obtient d'excellents résultats :

Eau de pluie	100 litres
Sulfate de cuivre	2kil.,500
Acide oxalique	5kil.,300
Ammoniaque	5kil.

Les pièces de fonte, avant de passer au bain, sont soumises à un décapage dans une dissolution d'acide sulfurique à un dixième, puis à un dégraissage dans une dissolution chaude de carbonate de soude. Chacune de ces opérations est suivie d'un rinçage à l'eau.

Les anodes sont en cuivre; elles entretiennent constamment la richesse du bain, auquel il faut ajouter de temps en temps un peu de dissolution ammoniacale de cuivre.

Quand les pièces sont couvertes d'une couche de cuivre conti-

nue, on les termine dans un bain de sulfate de cuivre ; c'est une dissolution de sulfate contenant environ 10 p. 100 d'acide sulfurique libre. Ce bain marche plus vite que le premier et coûte moins cher.

Le bain d'oxalate de cuivre se charge peu à peu d'oxalate de fer dû au décapage des pièces ; mais la présence de ce sel, au lieu de nuire au dépôt, ne sert qu'à l'améliorer. Il se passe là un phénomène analogue à celui que nous avons déjà signalé dans les bains d'argent. Un bain neuf donne des dépôts *aigres* ; ceux que l'on obtient avec les vieux bains sont beaucoup plus *liants*. Cette considération a sa valeur ; car si le dépôt de cuivre est un peu cassant, les différences de température peuvent y déterminer des fissures, et quand l'objet passe dans le bain de sulfate, ces points sont vivement attaqués par l'acide sulfurique.

De tous les procédés de cuivrage que nous avons passés en revue, c'est celui de M. Gauduin modifié de cette sorte qui réunit au plus haut degré les conditions nécessaires pour une exploitation industrielle. Il est rapide et économique. Mis en pratique depuis plusieurs années aux ateliers du Val-d'Osne, il donne de très beaux résultats, et permet de recouvrir d'une couche de cuivre continue les statues les plus compliquées. Ainsi, on a pu voir à l'Exposition de 1878 deux taureaux en fonte de grandeur naturelle revêtus par ce système d'une couche de cuivre absolument uniforme. Malheureusement, ce procédé n'échappe pas à la critique que nous avons formulée plus haut, en parlant du système Oudry : il juxtapose deux éléments de pile, le cuivre et le fer. Nous avons vu l'inconvénient qui en résulte. Il est donc permis de se demander si le cuivrage du fer a de grands avantages et s'il ne serait pas plus économique, dans bien des cas, par exemple pour les objets destinés à l'ornementation des voies publiques, d'employer des pièces en bronze plutôt que de recouvrir le fer d'une couche de cuivre qui n'en garantit la surface qu'au prix d'un entretien continuel.

384. Décapage des métaux soumis à une opération galvanoplastique. — Le décapage des surfaces qui doivent être recouvertes d'une couche métallique par la galvanoplastie est une question de la plus grande importance. Voici, à ce sujet, quelques détails qui nous semblent assez intéressants, sur un procédé inventé par

MM. Gutensohn et James, de Londres. Les objets sont plongés dans un bain acide; mais au lieu de favoriser l'attaque par la chaleur, comme on le fait souvent, les inventeurs ont recours à l'électricité. Le métal est relié au pôle positif d'une dynamo, dont l'autre pôle communique avec la seconde électrode. Le courant électrique produit ainsi un rapide décapage.

PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

Les opérations de galvanoplastie exigent l'emploi d'un courant continu; avec des courants alternatifs, en effet, le dépôt qui se formerait sur une électrode à un moment donné serait immédiatement dissous dès que le sens du courant serait renversé.

385. Procédé de la pile simple. — Pour les bains de cuivre, on a beaucoup employé le système de la *pile simple*, dans lequel le bain fournit lui-même les liquides de la pile. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déposer du cuivre au moyen d'un bain de sulfate. Le zinc, renfermé avec de l'eau acidulée dans un vase poreux, est plongé dans ce bain. La pièce, ou le moule qu'il s'agit de recouvrir, baigne à une certaine distance du vase poreux et est relié au zinc par un conducteur extérieur; la richesse de la liqueur est entretenue par des cristaux de sulfate de cuivre.

Dans ce système, le bain fonctionne comme une pile Daniell, dont le zinc constitue le pôle négatif et dont la pièce à recouvrir forme le pôle positif; le circuit est complété par le conducteur et par le liquide. Un courant prend donc naissance, et le métal dissous dans le bain vient se déposer sur la pièce.

On fait varier à volonté l'intensité du courant en augmentant ou en diminuant le nombre de vases poreux et de plaques de zinc; on peut ainsi proportionner la quantité d'électricité à la surface qu'on veut recouvrir. Mais il est impossible de faire varier la force électromotrice, puisque, sous le rapport de la tension, la pile est toujours réduite à un seul élément. Aussi ce procédé ne peut-il s'appliquer qu'avec des dissolutions n'exigeant pour leur décomposition que la force électromotrice d'un seul élément.

Ce système a l'inconvénient que la composition du bain finit à la longue par s'altérer, par suite de la présence du sulfate de zinc qui filtre toujours plus ou moins à travers les vases poreux. Mais il est très économique, parce qu'il supprime toutes les batteries de piles, qui occupent toujours beaucoup de place dans un atelier, exigent des soins continuels et consomment des réactifs en quantité considérable.

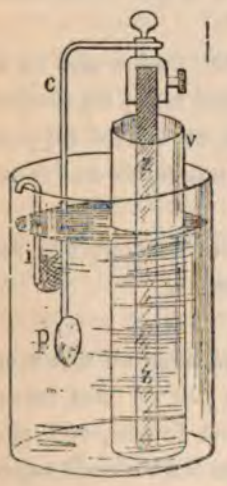


Fig. 228.

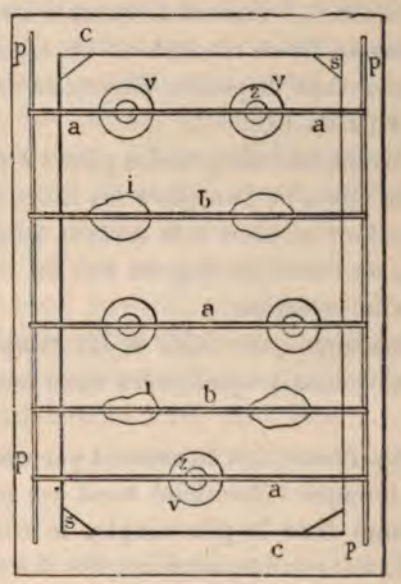


Fig. 229.

Le bain simple était donc fort employé quand la galvanoplastie n'avait à son service que des piles pour la production de l'électricité. Depuis l'invention des machines électriques, il est moins usité, surtout pour les installations d'une certaine importance ; du reste, les piles n'ont plus leur raison d'être que dans les ateliers très petits.

La figure 228 représente la disposition d'un bain à pile simple pour des pièces de faible dimension. Z est une tige de zinc amalgamé ; P est la pièce qu'il faut recouvrir et qui est réunie au zinc par le conducteur C; V est le vase poreux contenant l'eau acidulée. Une petite corbeille *i*, suspendue à l'intérieur du bain, contient des cristaux destinés à en entretenir la richesse.

Quand on a à traiter à la fois une grande quantité de pièces, on peut adopter la disposition suivante (fig. 229). La cuve C, en bois doublé de gutta-percha ou en plomb, suivant la nature du liquide, contient le bain; deux plaques de laiton *p*, *p* sont fixées sur les bords supérieurs de la cuve; des cylindres en laiton *a*, *a*, *a* viennent s'appuyer horizontalement sur ces plaques et supportent les zincs *z*, *z* contenus dans les vases poreux *v*, *v*; d'autres cylindres en laiton *b*, *b* servent à soutenir les pièces I, I suspendues par des lames de laiton recourbées en forme de crochet. Dans les encoignures sont disposées de petites corbeilles S qui contiennent les cristaux du bain.

Quand on a de grandes pièces à recouvrir, on les met au milieu de la cuve, et l'on place les zincs de chaque côté, en proportionnant leur nombre à la surface à recouvrir et en les rapprochant plus ou moins de la pièce suivant les anfractuosités ou les saillies qu'elle présente.

Dans quelques ateliers, on remplace les vases poreux par des vessies dans lesquelles les zincs sont enfermés.

386. Production du courant par une pile séparée ou une machine. — Lorsque l'électricité n'est pas produite par le bain lui-même, comme dans la pile simple, le courant est fourni, soit par une pile, soit par une machine. On fixe alors sur les rebords supérieurs de la cuve deux lames de laiton : l'une communique avec le pôle positif de la pile; l'autre avec le pôle négatif. Les anodes sont accrochées à des tubes de laiton reliés à la première. Les pièces sont suspendues par des crochets plats à des tubes qui s'appuient sur la seconde.

Les piles Daniell sont généralement employées en galvanoplastie; mais quand on a besoin d'une force électromotrice considérable, on se sert des piles Bunsen, malgré les vapeurs qu'elles dégagent, parce que leur force électromotrice permet de diminuer le nombre des éléments.

Les piles Leclanché ne peuvent servir à cause de leur faible intensité et de la facilité avec laquelle elles se polarisent. Les piles au bichromate coûtent trop cher.

Pour des exploitations un peu importantes, la machine électrique

seule fournit l'électricité d'une manière économique. Le système de la machine, sa force électromotrice, son intensité, doivent nécessairement varier selon le travail qu'on a à produire.

387. Calcul de la source d'électricité. — Une question fort importante en galvanoplastie est de proportionner la source d'électricité au travail demandé. Il y a là d'abord une condition d'économie. Ensuite chaque solution saline exige pour sa décomposition une force électromotrice minima. Si cette force n'est pas atteinte, aucun travail n'est produit; d'un autre côté, si on la dépasse beaucoup, on s'expose à détériorer très vite ses bains par la formation de produits secondaires. L'expérience est le véritable guide que l'on doit suivre, parce qu'il y a toujours une grande différence entre les résultats de la pratique et les chiffres indiqués par la théorie ; mais le calcul permet d'éviter bien des tâtonnements et d'établir rapidement les limites entre lesquelles on devra se placer.

Pour calculer cette force électromotrice, on peut s'appuyer sur les considérations que nous avons développées à propos de la détermination de la force électromotrice d'une pile. Pour celle-ci nous avons établi la formule :

$$x = 0{,}043 \times C, \qquad (a)$$

dans laquelle x exprime en volts la force électromotrice cherchée, et C le nombre de calories (kilogramme-degré) qui sont produites par la combinaison des réactifs de l'élément, ce nombre étant rapporté à l'équivalent chimique de ces réactifs.

Le raisonnement dont nous nous sommes servis pour les liquides de la pile peut être appliquée à une dissolution chimique quelconque et à un bain de galvanoplastie ; car la quantité de chaleur dépensée par la décomposition d'un corps est équivalente à celle qui est produite par sa formation.

La formule (a), qui nous donnait la force électromotrice d'une pile, nous permettra donc de calculer celle qu'il faut dépenser pour décomposer une dissolution saline : il n'y a qu'à remplacer C par le nombre de calories produites par la formation d'un équivalent chimique du liquide donné ; x exprimera en volts la force électromotrice cherchée.

Exemples. — 1° Quelle est la force électromotrice nécessaire à la décomposition d'un bain de sulfate de cuivre?

Le nombre de calories produites par la formation d'un équivalent de sulfate étant 29,6 calories, nous n'aurons qu'à remplacer dans la formule précédente C par 29,6 et nous aurons

$$x = 1{,}27 \text{ volt.}$$

2° Quelle est la force électromotrice nécessaire à la décomposition de l'eau ?

La chaleur de formation d'un équivalent d'eau étant 34,45 calories, la formule (a) nous donnera

$$x = 1{,}48 \text{ volt.}$$

Nous indiquons à la fin de cet ouvrage les chaleurs de formation des principaux corps.

388. Dépense de travail dans les bains. — Pour calculer le travail qu'il faut dépenser pour séparer dans un bain une certaine quantité de métal, reportons-nous à ce que nous avons dit sur la la manière d'évaluer le prix de revient du cheval-heure dans une pile.

Nous avons établi la formule

$$P = 27{,}5 \times \frac{h \times n}{E}, \qquad (b)$$

au moyen de laquelle on peut calculer le poids P de chaque réactif qu'il faut employer dans une pile pour produire un cheval-heure. h est l'équivalent chimique du réactif considéré, n le nombre d'équivalents engagés dans la réaction, et E exprime en volts la force électromotrice de la pile. Le raisonnement dont nous nous sommes servis pour les liquides de la pile peut être adopté pour la dissolution saline qui forme le bain, et le poids des réactifs engagés dans la combinaison sera donné par la même formule. Il faudra seulement remplacer E par la force électromotrice telle que nous l'avons calculée dans le paragraphe précédent. Connaissant le poids de métal que peut produire un cheval-heure, on aura ensuite facilement le travail nécessaire pour obtenir un poids donné.

Exemple. — Supposons qu'on cherche le travail nécessaire pour séparer 1 kilogramme de cuivre d'une dissolution de sulfate de ce métal.

Remplaçons dans la formule précédente h par 31,8, équivalent du cuivre, n par 1 et E par 1,27 volt, c'est-à-dire par la force électromotrice nécessaire à la décomposition du sulfate de cuivre; nous avons :

$$P = 27,5 \times \frac{31,8 \times 1}{1,27} = 688 \text{ grammes.}$$

Ainsi 1 cheval-heure peut déposer 688 grammes de cuivre. Pour obtenir 1 kilogramme, il faudra donc près de 1,5 cheval-heure.

On peut encore obtenir très simplement le même résultat au moyen du tableau que l'on trouvera à la fin de ce volume et qui donne les équivalents chimiques et électro-chimiques des principaux corps.

Supposons qu'on cherche le travail nécessaire pour déposer 1 kilogramme de cuivre dans un bain de sulfate. Reportons-nous à la formule

$$T = \frac{EI}{g};$$

E est la force électromotrice nécessaire pour opérer la décomposition, soit 1,27 volt ; I est l'intensité du courant.

Le tableau nous indique que, pour libérer 1 gramme de cuivre, il faut 3030,6 coulombs.

Le travail nécessaire sera donc :

$$T = \frac{1,27 \times 3\,030,6 \times 1\,000}{9,81} = 384\,810 \text{ kilogrammètre}.$$

Soit 1,5 cheval-heure.

389. Actions secondaires. Anodes solubles. — En appliquant les calculs qui précèdent, il faut examiner avec le plus grand soin les actions secondaires qui se produisent quelquefois dans la décomposition de certains sels et qui modifient beaucoup les résultats. Ainsi, nous avons vu qu'on ne pouvait décomposer l'eau par un seul élément Daniell ; c'est que nous supposions alors qu'on opé-

rait avec des anodes insolubles dans le bain. Si l'on emploie au contraire des anodes solubles, c'est-à-dire oxydables, en cuivre par exemple, avec de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, les résultats ne sont plus les mêmes, et un seul élément suffit.

En effet, l'oxygène résultant de la décomposition de l'eau tend à s'unir au cuivre de l'anode pour former un oxyde, qui donne du sulfate avec l'acide sulfurique contenu dans l'eau acidulée ; il y a donc deux actions distinctes :

1° Décomposition de l'eau qui absorbe 34,45 calories ;

2° Formation de sulfate de cuivre qui dégage 29,6 calories.

Le nombre de calories à fournir est donc la différence de ces deux chiffres, soit 4,85, et la force électromotrice nécessaire, d'après la formule (*a*), sera 0,21 volt.

Si nous opérons sur une dissolution de sulfate de cuivre avec des anodes insolubles, nous avons vu qu'il faut une force électromotrice égale à 1, 27 volt, ce qui représente 2 éléments Daniell en tension.

Mais si l'anode positive est en cuivre, la question est absolument changée. Le travail de décomposition du sulfate opéré dans le bain sera compensé par le travail de dissolution de l'anode ; il n'y aura donc plus de travail électro-chimique à dépenser. Le bain fonctionnera comme une simple résistance, et le seul travail de la pile consistera à vaincre cette résistance. Aussi la moindre force électromotrice suffira-t-elle pour obtenir un dépôt sur la cathode. C'est ce qui explique comment la *pile simple*, que nous avons décrite précédemment, peut être employée malgré la faible force électromotrice qu'elle donne.

Les actions secondaires qui accompagnent la décomposition des bains sont souvent assez compliquées. Si l'on électrolyse un sel alcalin, le sulfate de potasse par exemple, on n'obtient pas le potassium au pôle négatif, comme l'indique la théorie. Cependant ce métal se dépose réellement, et la décomposition du sulfate de potasse a lieu conformément à la formule suivante :

$$SO^3KO = K + SO^3 + O.$$

Mais il se produit en même temps une action secondaire qui dénature le résultat ; aussitôt qu'il est mis en liberté, le potassium

décompose l'eau, et l'on observe finalement une production d'hydrogène qui se dégage au pôle négatif ; l'hydrate de potasse reste dissous et l'on a :

$$K + 2HO = KO,HO + H.$$

Il en est de même avec tous les métaux qui décomposent l'eau à froid, à moins qu'on ne recoure à quelque artifice, comme d'amalgamer le métal au fur et à mesure de sa production, en plaçant du mercure au pôle négatif.

De même, dans l'électrolyse du protochlorure d'étain, le chlore, au lieu de se dégager, forme du bichlorure d'étain autour de l'anode positive avec les portions du liquide qui n'ont pas encore été décomposées.

Les exemples de ces réactions sont très nombreux.

Aussi, dans l'interprétation des phénomènes produits par l'électrolyse et dans leur mesure, est-il indispensable d'apporter une grande attention à l'étude de ces actions secondaires, dont l'influence sur les résultats définitifs est souvent considérable.

390. — Pour montrer combien cette considération est importante et pour indiquer la marche à suivre en pareil cas, nous ne croyons pouvoir mieux faire que de citer les passages suivants empruntés à un mémoire présenté par M. Berthelot à l'Académie des sciences :

L'application des lois établies par MM. Joule et Favre entre les forces électromotrices et les chaleurs de combinaison des métaux est souvent fort obscure, surtout quand il se produit des actions secondaires et qu'il s'agit de savoir quelle est la somme exacte de toutes les énergies qui concourent réellement au phénomène électrolytique.

Les physiciens admettent aujourd'hui que l'électrolyse du sulfate de potasse, SO^4K, a lieu suivant les mêmes règles que celle du sulfate de cuivre. L'acide sulfurique et l'oxygène se portent séparément au pôle positif et le métal va au pôle négatif. Si ce métal ne décompose pas l'eau, il se précipite sur l'électrode ; sinon il est remplacé par de l'hydrogène. C'est ce qui arrivera, par exemple, avec le sulfate de potasse. Mais la force électromotrice nécessaire pour produire l'électrolyse peut être calculée *a priori* de trois manières différentes :

1° On peut supposer qu'elle doit être assez grande pour mettre à nu le potassium, la réaction de ce métal sur l'eau étant un phénomène secondaire qui n'intervient pas dans le travail dépensé pour établir le circuit électrolytique. Dans ce cas, la décomposition de SO^4K en $SO^3 + O + K$ absorbant 98 calories, il faudrait au moins 4 éléments Daniell et même un peu plus.

2° On peut supposer, au contraire, que la force électromotrice diffère peu de celle qui préside à la décomposition de l'eau, ou plus exactement de l'acide sulfurique [illegible] des mêmes corps, oxygène et hydrogène, la séparation du [illegible] ne portant que sur une fraction : la force équivalente [illegible] 31,5 calories. Cette opinion m'a paru être celle des physiciens [illegible].

3° [illegible] conduit en définitive, au pôle positif, de l'acide sulfurique [illegible] oxygène qui se dégage, au pôle négatif, de la potasse et de l'hydrogène : l'acide [illegible] séparés par le travail des forces électromotrices, [illegible] l'exception des portions qui se recombinent peu à peu [illegible] diffusion. Ces portions étant minimes, dans un temps donné, leur [illegible] combinaison n'intervient que pour une fraction négligeable. Il semble [illegible] que le travail nécessaire pour séparer l'acide et la base doit être [illegible] précédent.

SO^3K étendu + HO forment ainsi :

SO^3 étendu + O au pôle positif
KO étendu + H au pôle négatif ;

la chaleur absorbée étant 50,2 calories, ce qui revient à ajouter la séparation de la potasse et de l'acide [illegible] calories.

C'est [illegible] exacte. En effet, si dans [illegible] de potasse [illegible] deux électrodes formées par [illegible] zinc [illegible] tubes de verre, il ne se dégage aucun gaz sous l'influence des systèmes voltaïques suivants :

2 éléments zinc platine (équivalents à 35[illegible]).
2 [illegible] platine [illegible]
2 [illegible] platine [illegible] cadmium équivalents à [illegible]).

Il faut donc une force électromotrice plus grande que pour l'acide sulfurique [illegible] 31,5 calories.

Au contraire, il y a dégagement de gaz aux deux pôles avec les systèmes suivants :

3 éléments zinc platine (37[illegible]).
2 [illegible] zinc platine — 2 zinc cadmium (31[illegible]).
2 [illegible] zinc cadmium (37[illegible]).
1 [illegible] + 1 zinc platine [illegible] 1 zinc cadmium (31[illegible],5).

On voit que la limite des forces électromotrices répond à ce travail où la potasse [illegible] 50,2 calories). Elle est fort différente de celle des électrodes [illegible] chimique [illegible].

Si nous prenons maintenant, par exemple, un sel haloïde :

La [illegible] du chlorure de potassium dissous en chlore gazeux et potassium [illegible] Cl + K, [illegible] 82,3 calories. Mais, si le potassium se change en potasse aux dépens de l'eau, il en résulte un dégagement de — 82,3 — 31,5 = + 17,8 calories ; si le chlore lui-même demeure dissous, condition

dans laquelle [illegible]
d'oxydes de [illegible]
5 ou 6 [illegible]
actions [illegible]
l'électrolyse [illegible]
tible [illegible]

Il s'agit de [illegible]

En fait, on a [illegible]

1 Daniell [illegible]
2 Éléments [illegible]
1 Daniell — [illegible]

Mais [illegible]

3 Éléments [illegible]
2 Daniell [illegible]
1 — — [illegible]
2 Éléments [illegible]

On voit par [illegible] pas la mise [illegible] la potasse [illegible] sition de [illegible] est donc par[illegible]

L'électrolyse [illegible] que celle du [illegible] des [illegible] qu'exigerait [illegible] ration de l'acide [illegible] du métal aux dépens [illegible]

En général, la [illegible] que la plus petite [illegible] les quantités de chaleur [illegible] compte de toutes les [illegible] qu'il y ait lieu de distinguer [illegible] les réactions [illegible]

Ces observations [illegible] qu'on pourrait appeler le principe de la [illegible] électrolyses, en vertu duquel une décomposition [illegible] que la somme des énergies nécessaires est [illegible]

Ce principe se vérifie [illegible] polarisation des électrodes, c'est-à-dire formation de composés secondaires qui, communément unis à la matière même des électrodes et qui enrayent l'électrolyse parce qu'ils tendent à développer une force électromotrice de signe contraire. La limite des forces électromotrices efficaces est incertaine quand il y a polarisation. Pour tenir compte de celle-ci et vérifier si elle rentre dans la loi commune, il faudrait savoir la nature réelle des composés qu'elle met en jeu et leur chaleur propre de formation.

391. Influence des conducteurs. — Les conducteurs doivent avoir la plus grande section possible, pour éviter la perte due à leur résistance. Cette perte est toujours très considérable, et l'industriel n'aura jamais intérêt à économiser de ce chef le capital de première installation. Les chiffres suivants montrent combien cette question est importante :

Supposons que, dans un conducteur en cuivre de 100 mètres de longueur et de 5 millimètres de diamètre, il passe un courant ayant 60 ampères d'intensité.

Le travail transformé en chaleur par la résistance R de ce conducteur est égal à $\frac{RI^2}{g}$.

Or la résistance d'un fil de cuivre de 1 mètre de long et 1 millimètre de diamètre étant 0,02057 ohm, celle d'un fil de 1 mètre de long et de 5 millimètres de diamètre est donnée par

$$\frac{r}{0{,}02057} = \frac{1}{5^2}$$

d'où

$$r = 0^{\text{ohm}},000823\,;$$

et la résistance d'un circuit de 100 mètres sera égale à 0,0823 ohm.

Le travail absorbé est donc $\frac{0{,}0823 \times 60^2}{9{,}81} = 30$ kilogrammètres, c'est presque un demi-cheval-vapeur.

Si, au lieu de cuivre, on emploie le fer, la perte est encore plus considérable. En effet, la résistance d'un fil de fer de 1 mètre de long et de 1 millimètre de diamètre étant 0,125 ohm, le travail absorbé par le même courant dans un fil de fer de 5 millimètres de diamètre et de 100 mètres de longueur sera donné par l'équation :

$$x = \frac{0{,}125}{5^2} \times 100 \times \frac{60^2}{9{,}81} \text{ d'où } x = 180 \text{ kilogrammètres.}$$

Ces chiffres suffisent pour démontrer que, dans une installation de cette espèce, l'industriel ne devra pas reculer devant la dépense occasionnée par les conducteurs électriques, bien qu'elle paraisse quelquefois considérable. Elle est vite compensée par l'économie de force motrice.

392. Intensité du courant. Dimensions et dispositions des électrodes. — L'intensité du courant a une grande influence sur la nature des dépôts. Il en est de même naturellement de la dimension des anodes et de l'acidité du bain, dont dépend la résistance du circuit. Par exemple, si, dans un bain de sulfate de cuivre, l'intensité est trop forte ou l'anode trop grande, ou si le bain est trop acide, le dépôt se fait en *poudre brune*. Pour y remédier, on augmente la résistance du circuit, et pour cela on diminue la surface de l'anode ou bien on éloigne les deux électrodes l'une de l'autre. On peut encore placer sur le conducteur une résistance formée par un fil fin qu diminue l'intensité du courant.

Au contraire, quand l'intensité est trop faible, ou que l'anode est trop petite, ou bien lorsque le liquide est trop pauvre en acide, le cuivre se dépose lentement ; il est cristallisé et cassant. Généralement on donne aux anodes une surface à peu près égale à celle qu'il s'agit de recouvrir.

La position relative des électrodes influe aussi sur la qualité des dépôts. Si deux surfaces planes sont placées parallèlement en face l'une de l'autre, l'épaisseur obtenue n'est pas précisément égale en tous les points. Le métal se dépose toujours en plus grande quantité à la partie inférieure de la cathode : c'est que le liquide est plus dense et, par conséquent, plus conducteur au fond de la cuve.

Quand le dépôt est trop abondant en un point, il s'y forme des stries noires qu'il faut éviter avec soin.

Aussi les objets destinés à rester longtemps dans un bain doivent-ils être visités souvent et changés de position. Quelquefois on imprime à la pièce un mouvement lent et continu en la suspendant à un cadre mobile. Enfin, il est bon d'agiter de temps en temps la masse du liquide.

Quand on opère sur de grandes pièces offrant des reliefs et des creux très prononcés, comme des statues compliquées, il faut éloigner les anodes autant que le permet la dimension des cuves, bien que la théorie indique que cette distance doive être aussi petite que possible pour diminuer la résistance opposée par le bain. C'est que, dans ces conditions, l'influence des parties saillantes se fait moins sentir, et que le courant, qui, sans cela, se porterait tout

entier sur ces points, se répartit mieux sur la surface totale. On évite ainsi l'inconvénient d'avoir sur les reliefs des dépôts considérables d'aspect grenu, tandis que les creux ne présentent que quelques traces de métal. Cette précaution est surtout importante dans le cas où le bain est formé d'un liquide qui attaque la pièce à recouvrir.

En outre, en augmentant la distance, on obtient généralement des dépôts de meilleure apparence ; ils sont plus *liants*.

Quelquefois, quand les pièces présentent des creux très profonds, on est obligé de recourir à l'expédient suivant. On dispose une petite plaque ou un fil du même métal que l'anode, épousant à peu près la forme de la surface qu'il faut métalliser et placée à une distance de quelques centimètres. L'électricité y est amenée par un fil fin dérivé du courant principal.

Comme dans un atelier de galvanoplastie, on opère généralement sur des pièces de formes et de dimensions très variables, tous les bains ne peuvent pas être réglés de la même façon, d'autant plus que la composition des liquides n'est pas toujours la même pour tous. Certaines cuves, réservées aux objets de petite dimension, exigent un faible courant, tandis que les bains voisins peuvent demander une intensité considérable. On ne peut donc pas, dans la plupart des cas, disposer les cuves en tension sur le même circuit. On les place plutôt en dérivation et l'on donne aux différents conducteurs qui leur amènent le courant des diamètres proportionnés au travail à produire.

Les auges destinées à contenir les bains se font, suivant leurs dimensions, en verre, en poterie, en bois enduit de vernis ou recouvert d'une couche de gutta-percha.

La chaleur, en facilitant les réactions chimiques, exerce une grande influence sur la rapidité et la nature des dépôts. En outre, comme elle permet aux liquides de dissoudre une plus grande quantité de réactifs, elle diminue leur résistance. Dans quelques cas, elle est indispensable, surtout lorsque les réactions qui se produisent sur l'anode forment des sels peu solubles. Si l'on ne chauffe pas, les plaques se couvrent alors d'une couche qui peut quelquefois empêcher complètement le passage du courant.

Pour faire usage de la chaleur, il faut employer le bain-marie ou

le bain de sable, c'est-à-dire que la cuve qui contient le bain galvanique est placée dans une seconde enveloppe, remplie d'eau ou de sable et chauffée par l'action directe d'un foyer.

Lorsqu'on a à traiter par la galvanoplastie une grande quantité de pièces lourdes et encombrantes, par exemple quand il s'agit de cuivrer ou de nickeler des statues, des objets d'ornementation en fonte, il est important que l'atelier soit disposé de façon à faciliter la main-d'œuvre et à éviter les pertes de temps. En outre de la question économique, il y a cette considération que les objets doivent passer par des bains de décapage et par des lavages nombreux. Il est donc utile qu'après ces manipulations ils ne soient pas exposés trop longtemps à l'influence oxydante de l'atmosphère. De plus, quand on doit plonger dans l'acide sulfurique des pièces de formes compliquées pesant quelques centaines de kilogrammes, il est nécessaire que ces opérations se fassent sans embarras ; sinon les ouvriers peuvent être exposés à des accidents assez graves.

D'un autre côté, les pièces, une fois dans les bains, doivent être souvent visitées ; il faut le plus fréquemment possible les changer de place, comme nous l'avons déjà dit, pour modifier la répartition du courant entre les différentes parties. Toutes ces manœuvres doivent être très simples et très rapides. On y arrive en disposant un treuil sur un pont roulant pouvant se déplacer sur toute la longueur de l'atelier.

Il est utile que l'on place en face de chaque bain, le plus en vue possible, un appareil indiquant le passage du courant. On ne peut songer, dans des ateliers exposés à l'humidité et à des vapeurs acides, à disposer des galvanomètres de précision. Il suffit en général de mettre à proximité du circuit un cadran sur lequel se meut une aiguille aimantée verticale. Les divisions du cadran sont tout à fait arbitraires et peuvent n'avoir aucun rapport avec les unités d'électricité. Un pas de vis permet d'éloigner plus ou moins le cadran du circuit pour régler la sensibilité de l'appareil. L'ouvrier sait que pour telle déviation il obtient un dépôt d'une certaine nature : c'est l'expérience qui le dirige.

Il est d'ailleurs impossible pour des bains de grande dimension, dans lesquels la surface et la forme des pièces changent continuellement, de procéder en s'appuyant sur des considérations

purement théoriques. L'expérience seule indique les précautions à prendre. Lorsque le praticien est dans l'incertitude, il doit retirer souvent ses pièces des bains, et l'aspect du dépôt est pour lui le meilleur guide.

Nous avons essayé de décrire plus haut les procédés de galvanoplastie qui nous ont semblé les plus intéressants. Nous ne pouvions songer dans notre ouvrage à indiquer tous les systèmes qui existent : ils varient à l'infini. On peut même dire que chaque fabricant a sa recette particulière, dont il se réserve soigneusement le secret, pour la composition de ses bains et la conduite de ses opérations. Enfin il y a dans la pratique une foule de détails que l'expérience seule peut enseigner. Mais il existe certaines règles générales dont on ne peut s'écarter : ce sont elles que nous avons cherché à exposer.

CHAPITRE II

ÉLECTRO-MÉTALLURGIE

L'électricité a, depuis quelques années, reçu d'importantes applications dans la métallurgie. En combinant les réactions chimiques et la force électrolytique des courants, on est arrivé à des résultats très remarquables : certains métaux, comme le cuivre, ont été obtenus à l'état de pureté absolue ; d'autres, comme l'aluminium, dont l'extraction était entourée de difficultés presque insurmontables, sont produits aujourd'hui d'une façon industrielle.

393. Raffinage des métaux. — On a fait de nombreux essais pour raffiner les métaux par l'électrolyse ; le cuivre et le plomb surtout ont été traités par cette méthode. On est parvenu à obtenir ainsi des métaux chimiquement purs, et les plaques de cuivre qui figuraient aux Expositions de 1881 et de 1889 montraient tout le parti qu'on peut tirer de l'électricité pour les opérations de ce genre. Voici les principes sur lesquels on s'appuie ordinairement. La plaque métallique, contenant des impuretés dont on veut la débarrasser, est placée comme anode dans un bain formé par un sel du même métal ; la cathode est une plaque mince de ce métal à l'état de pureté. C'est une opération tout à fait semblable à la galvanoplastie, sauf que l'on cherche plutôt la quantité que la beauté du dépôt.

Comme les anodes sont solubles, tout le travail que doit fournir la machine sert uniquement à vaincre la résistance électrique du bain. On la diminue autant que possible en augmentant la surface des électrodes et en réduisant la distance qui les sépare. Pour

obtenir la quantité maxima de dépôt avec une dépense donnée de force motrice, on dispose les bains en tension. Dans le début, on les plaçait en dérivation et l'on faisait des machines d'une très faible résistance intérieure, pour avoir une grande intensité avec une force électromotrice peu considérable. Plus tard, on est arrivé à adopter la disposition contraire.

394. Expériences de M. Gramme. — M. Gramme a entrepris à ce sujet une série d'expériences que nous allons résumer et qui ont tout à fait éclairé la question.

1° Il a commencé par disposer en dérivation des bains de sulfate de cuivre en quantité variable ayant tous des anodes solubles de même surface (16 décimètres carrés). Il a trouvé que le dépôt n'a pas varié (soit environ 7 grammes par heure) avec un seul bain ou 36 bains, c'est-à-dire avec une surface de 16 décimètres carrés ou de 6 mètres ; la quantité de cuivre déposée par kilogrammètre de travail dépensé est restée à peu près la même dans les diverses expériences : elle n'a pas dépassé $1^{gr},96$.

2° Tous les bains ont été mis en tension, et leur nombre a varié de 1 à 48. La surface d'anodes était la même dans chaque bain, et la vitesse de la machine croissait avec le nombre de bains : la force électromotrice a varié de 1 à 8 volts. Le dépôt de cuivre a augmenté avec le nombre de bains ainsi que le rendement par kilogrammètre dépensé ; le poids de cuivre par kilogrammètre a varié de $1^{gr},58$ à $23^{gr},18$.

La conclusion est bien évidente, et l'on voit quelle économie il y a, quand on dispose d'anodes solubles, à mettre les bains en tension plutôt qu'en dérivation.

3° Dans une troisième série d'expériences, M. Gramme a maintenu l'intensité du courant constante, ce qui l'a amené à augmenter la surface d'anodes en même temps que le nombre de bains en tension, afin que la résistance restât toujours la même. Le poids de cuivre déposé dans chaque bain est demeuré invariable dans toutes les expériences, et le poids total a varié de 15 à 60 grammes, sans que la vitesse de la machine, la force électromotrice et le travail dépensé aient changé. Comme la quantité totale de cuivre déposée est proportionnelle au nombre de bains, on pourrait conclure de

là qu'avec une quantité déterminée de travail, on doit obtenir un dépôt illimité. Mais en réalité il n'en est pas ainsi, car le bain offre toujours une résistance, quelque petite qu'elle soit. En outre, il existe une perte de travail due aux impuretés des anodes, qui peuvent provoquer des dégagements gazeux et produire une certaine polarisation. Dans la pratique, il y a un point à partir duquel on a plus d'économie à augmenter la source d'électricité que la surface des bains. Mais cette expérience montre bien qu'avec des anodes solubles le travail chimique est nul.

4° Dans une quatrième série d'expériences, M. Gramme a étudié l'influence de la solubilité des anodes, et au lieu de les faire en cuivre comme précédemment, il s'est servi du plomb qui est insoluble dans le sulfate de cuivre. Le dépôt de cuivre a été beaucoup moins considérable, la plus grande partie du travail étant absorbée par la polarisation.

395. Traitement des mattes de cuivre. — Le procédé indiqué par M. Eug. Marchese pour séparer le cuivre d'avec le plomb et l'argent contenus dans les minerais et les autres produits du traitement des substances argentifères, consiste à précipiter le cuivre dans un bain de sulfate, où les cathodes sont en cuivre pur et les anodes en mattes cuivreuses fondues et moulées. Les sulfures de l'anode se décomposent ; le fer se dissout dans le bain et donne un sulfate, le cuivre va se précipiter à la cathode. Les métaux peu solubles, le plomb, le bismuth, l'argent restent en boues ou dans les carcasses d'anodes désagrégées.

La transformation du sulfure de fer en sulfate vient ajouter la force électromotrice engendrée par cette oxydation à celle de la source d'électricité, de telle sorte qu'il suffit d'une machine assez faible pour opérer l'électrolyse.

D'un autre côté, le bain s'enrichit en sulfate de fer et doit être renouvelé : un perfectionnement consiste à faire circuler continuellement la dissolution obtenue par le lessivage des minerais grillés entre les cellules d'électrolyse et les vases digesteurs où l'électrolyse se charge à nouveau de métal ; cette disposition diminue très notablement la polarisation.

Si la matière première du traitement est une matte de richesse

moyenne, comme c'est le cas dans les applications ordinaires, le tiers environ de cette matte est fondu et moulé en plaques pour faire les anodes ; le reste est grillé de façon à fabriquer de l'acide sulfurique, et le résidu de ce grillage est lessivé avec cet acide pour obtenir la dissolution de sulfate. Ces opérations ne présentent en elles-mêmes rien de particulier.

L'électrolyse se fait dans des bacs réunis en tension de manière à obtenir dans l'ensemble une force électromotrice suffisante. Les anodes sont rangées verticalement, au nombre de 15 ou 20, dans des auges appropriées ; elles reposent sur deux voliges occupant le fond de l'appareil, de manière à laisser entre la paroi inférieure et le bas des plaques une distance d'environ 15 à 20 centimètres. Entre deux anodes est disposée une plaque de cuivre électrolytique formant cathode. Sur les deux côtés de l'appareil sont fixées des traverses en bois munies de dents, en forme de râteau, destinées à maintenir l'écartement des plaques. Les bassins sont disposés de façon à avoir entre leurs bornes une différence de potentiel de 1 volt environ.

Théoriquement, 1 ampère doit déposer dans chaque bain 28 grammes de cuivre par vingt-quatre heures ; en pratique, on obtient 80 à 90 p. 100 de ce poids. La surface des électrodes dans chaque bain est réglée de manière que le dépôt soit à peu près de 400 à 500 grammes par mètre carré de cathode en vingt-quatre heures.

Les anodes peuvent être sans inconvénients en mattes pauvres. La solution doit contenir plus de 1 p. 100 de cuivre pour que le dépôt se fasse bien. Il doit y avoir circulation continue entre les bains et les bacs de lessivage pour que la solution se régénère au fur et à mesure. Il faut faire passer dans chaque bain, en une heure, un volume de liquide égal à peu près au cinquième de celui qu'il peut contenir. En effet, si on ne le renouvelle pas, l'action réductrice peut se porter sur l'eau et la décomposer et alors le dépôt de cuivre n'est plus adhérent. Le même effet se produirait avec un courant trop fort.

D'après ce qui a été dit plus haut, on peut compter sur une production de 24 grammes de cuivre par vingt-quatre heures et par watt, soit de 18 kilogrammes par cheval, chiffre qu'on peut réduire 16 pour tenir compte du rendement de la dynamo.

Le cuivre obtenu est très pur et, d'après M. Marchese, jouirait d'une plus-value d'au moins 100 francs par tonne sur le cuivre raffiné ordinaire.

Le procédé n'a encore été appliqué qu'à des mattes assez riches, mais il est probable qu'il conviendrait également au traitement des minerais pauvres. En effet, les méthodes qui ont jusqu'à présent permis de traiter les minerais les plus pauvres sont précisément celles où l'on dissout le cuivre à l'état de sulfate, comme pour les pyrites d'Agordo et celles de Huelva. Dans ces deux cas, l'électrolyse remplacerait sans doute avec avantage la précipitation par le fer.

Voici quelques indications techniques, données par M. Marchese, sur l'usine installée à Stolberg. On y traite des mattes obtenues comme produit accessoire de la fonte de minerais argentifères complexes. Elles ont en général 15 à 20 p. 100 de cuivre, avec 20 p. 100 de plomb et 0,06 d'argent. On traite aussi une certaine quantité de mattes plus riches, à 50 ou 60 p. 100 de cuivre, qui sont réservées pour le grillage afin d'enrichir la solution.

Dimensions des électrodes	$0^m,60$ sur $0^m,60$.
— des bains	$L = 1^m$ $l = 0,68$ $H = 0,80$.
Nombre par bain.	7 anodes et 8 cathodes.
— des bains en tension. . . .	6
Circulation du liquide.	800 à 1 000 litres par heure.
Richesse de la solution.	3 à 4 p. 100 de cuivre.
Différence de potentiel aux bornes de la machine	5 volts 235.
Intensité moyenne.	92 ampères.
Dépôt par vingt-quatre heures . . .	13 kil. 322.
Force contre-électromotrice par bain	0 volt 425.
Résistance extérieure.	0 ohm 033.

Ces mesures se rapportent à un atelier d'essai.

L'atelier définitif, calculé pour une production de 500 à 600 kilogrammes par jour, comprend 58 bains ayant chacun 25^{m^2} de cathodes. Les cathodes sont retirées seulement tous les trois mois. Le poids total des anodes en travail est de 145 tonnes, dont la valeur totale est évaluée à 16 000 francs. On peut en compter la moitié puisqu'elles se dissolvent continuellement. Le poids du

cuivre immobilisé est donc la production de quarante-cinq jours. On trouve ainsi que le stock immobilisé vaudrait 40 000 francs pour une production annuelle de 200 tonnes.

396. — A la *Norddeutsche Affinerie* de Hambourg dirigée par M. Wohlwill, le courant est produit par six machines Gramme n° 1 et par une machine Gramme beaucoup plus puissante, construite sur un type spécial. La production journalière de cette usine est de 2 tonnes 1/2 de cuivre chimiquement pur.

Dans une première série de bains, les cuves, au nombre de 40, sont associées en deux séries de 20. La surface plongée des anodes est d'environ 30 mètres carrés dans chaque bain, ce qui représente une surface totale de 1 200 mètres carrés.

La distance entre les anodes et les cathodes est d'environ 5 centimètres. Les cathodes sont en cuivre affiné et ont à peu près 1 millimètre d'épaisseur. La quantité de cuivre déposée par jour est de 800 kilogrammes, soit $33^k,3$ par heure; la surface des anodes étant de 1 200 mètres carrés, le dépôt est donc de $27^{gr},7$ par mètre carré, et l'épaisseur atteint 3 millimètres par heure. La force motrice consommée est de 16 chevaux.

Dans une seconde installation, la *Norddeutsche Affinerie* a cherché à économiser encore la force motrice. Les bains forment deux séries composées chacune de 120 cuves associées en tension. La surface des anodes dans chaque bain est de 15 mètres carrés. Le courant est produit par deux machines Gramme type n° 1, accouplées en tension et pouvant produire, à la vitesse de 1 500 tours, 300 ampères et 27 volts.

La quantité de cuivre affinée est de 900 kilogrammes en vingt-quatre heures, soit $37^k,5$ par heure pour une surface de cathodes de 1 800 mètres carrés, ce qui donne à peu près une épaisseur de 1 millimètre par heure. La force motrice dépensée est de 12 chevaux.

MM. Eschger et Mesdach appliquent, à leur usine de Biache, le système électrolytique au raffinage de leurs cuivres. Ils se servent du type de machine Gramme que nous avons indiqué plus haut et qui a été construit pour M. Wohlwill. Cette machine

fournit le courant à 20 bains et produit 400 kilogrammes de cuivre par jour. Les bains sont associés en tension; le cadre positif de l'un communique avec le cadre négatif du bain suivant par un conducteur en cuivre. Un brise-courant ouvre automatiquement le circuit, quand la force de polarisation devient trop grande. Les cathodes en cuivre pur ont un millimètre d'épaisseur et sont repliées sur elles-mêmes à leur partie supérieure pour s'accrocher au cadre.

Les bains sont tous au même niveau et communiquent entre eux par leur partie inférieure. La solution est formée de sulfate de cuivre à 19 degrés Baumé. Les anodes sont en cuivre impur coulé en plaques de 1 centimètres d'épaisseur. Pour empêcher l'usure trop rapide de la partie qui affleure à la surface du bain, on recouvre cette portion de l'anode d'un vernis contenant du chromate de plomb.

La distance entre les plaques positives et négatives est de 7 centimètres.

L'argent et les impuretés du cuivre tombent en boue au fond de la cuve. Ce dépôt est ensuite fondu et traité par la coupellation.

La production de cuivre est de 700 kilogrammes par vingt-quatre heures; la surface des cathodes étant de 1 200 mètres carrés, l'épaisseur du dépôt est d'environ 3 millimètres par heure.

397. — Dans les installations de cette espèce, l'amortissement et l'intérêt du capital engagé constituent souvent la partie la plus importante du prix de revient. Ce résultat est dû à la surface énorme qu'on doit donner aux électrodes, ce qui nécessite une grande quantité de bains et de vastes emplacements.

En outre, la valeur du métal en traitement représente, comme on peut le voir, un capital important.

On est donc amené à chercher quelques modifications permettant de diminuer ces dépenses. On se demande naturellement s'il n'y aurait pas avantage à augmenter la quantité de cuivre déposée par mètre carré d'anode.

Nous avons vu qu'à Hambourg le dépôt était de 3 millimètres par heure et qu'il a été réduit à 1 millimètre. Chez MM. Eschger et Mesdach l'épaisseur est de 3 millimètres. L'expérience prouve

que, quand on dépasse ces limites, on obtient un dépôt grenu et sans adhérence.

On peut encore chercher à diminuer la distance des anodes; mais il y a une limite imposée par la pratique. On reconnaît en effet que l'anode abandonne à sa surface des corps étrangers, soufre, argent, antimoine. Si la cathode se trouve trop rapprochée, les manipulations sont difficiles, des contacts se forment entre les deux plaques, ou bien ces matières, entraînées par la pesanteur, viennent adhérer à la cathode et altèrent la pureté du dépôt. La distance généralement adoptée entre les plaques varie de 45 à 50 millimètres pour des électrodes ayant environ $0^m,60$ de hauteur.

La composition du bain ayant une grande influence sur sa résistance, on peut chercher à la modifier de manière à réduire la surface des électrodes. L'expérience a démontré que l'on ne devait guère s'éloigner de la composition suivante pour les bains d'affinage de cuivre :

Sulfate de cuivre ($CuO, SO^3 + 5HO$)	12 à 15 p. 100
Acide sulfurique libre.	5 à 7 p. 100.

Si l'on augmente la richesse en cuivre du bain, pour avoir une plus grande conductibilité, le dépôt devient irrégulier. Si l'on force la proportion d'acide, les anodes sont attaquées par le liquide, surtout à la surface.

Dans des questions de cette nature, c'est l'expérience qu'il faut consulter avant tout. Théoriquement, en prenant des surfaces d'anodes infinies, le travail dépensé serait nul. Mais nous venons de voir que si le travail est insignifiant, la dépense première est fort grande et l'amortissement des capitaux est un élément que l'industriel ne peut pas négliger.

398. Raffinage du plomb. Procédé Keith. — M. Keith pratique, aux Etats-Unis, le raffinage du plomb de la façon suivante :

Des plaques de plomb impur servant d'anodes sont reliées par des traverses métalliques au pôle positif d'une machine Weston. Les cathodes, rattachées de la même façon au pôle négatif, sont constituées par des plaques de plomb pur.

Le bain est formé par une solution concentrée d'acétate plom-

bique ou plutôt de sulfate de plomb dans l'acétate de soude. Les métaux positifs par rapport au plomb, comme le zinc et le fer, restent en dissolution ou ne se précipitent qu'à l'état d'oxydes, que l'on sépare facilement quand on refond le métal.

Voici les réactions qui se passent dans cette opération :

Sous l'action électrolytique, le sulfate de plomb se décompose ; le plomb se porte au pôle négatif, l'acide au pôle positif, où il dissout le plomb de l'anode avec le fer et le zinc qu'elle contient. L'or, l'argent, l'antimoine ne se dissolvent pas et tombent dans des sacs de mousseline où on les recueille.

La solution de plomb sert, comme on le voit, indéfiniment, et la seule perte qu'elle subit provient des métaux étrangers qui se dissolvent dans le bain et que le courant ne précipite pas.

On peut de plus obtenir l'or et l'argent renfermés dans le minerai. Pour cela, les résidus contenus dans les sacs de mousseline sont séchés et fondus dans des creusets avec de l'azotate de soude et du borax. L'or et l'argent restent à l'état métallique, tandis que l'arsenic et l'antimoine forment une scorie que l'on sépare par l'eau chaude.

D'après les expériences de M. Keith, avec 48 cuves, renfermant chacune 50 plaques de *base bullion* de 16 kilogrammes, on peut produire 10 tonnes de plomb en vingt-quatre heures au moyen d'une machine Weston de 12 chevaux. Les plaques ont 122 × 38 centimètres et 3 millimètres d'épaisseur.

Le tableau suivant donne la composition du bain et celle du dépôt obtenu sur l'anode :

	Avant raffinage.		Après raffinage.
Plomb	96,36	p. 100	99,9
Argent	0,5544	—	0,000068
Cuivre	0,315	—	0
Antimoine	1,07	—	traces
Arsenic	1,22	—	traces
Zinc, fer, etc.	0,4886	—	0

399. Métallurgie de l'aluminium. — La fabrication de l'aluminium par la réduction de l'alumine offre de très grandes difficultés ; car l'affinité de l'aluminium pour l'oxygène est telle que, pour réduire son oxyde, on doit recourir au sodium de telle sorte que l'aluminium revient ainsi à environ 20 francs le kilogramme.

[illegible]

[illegible]

[illegible]

hauteur de l'extrémité des électrodes négatives ; on abaisse ensuite l'électrode positive centrale jusqu'à ce que l'arc voltaïque prenne naissance, avec un courant de 80 à 100 volts et de 60 à 80 ampères. En quelques minutes la chaleur développée amène la fusion du minerai au voisinage de l'arc, et on remplit peu à peu le creuset, de manière à produire une masse fluide incandescente au centre du bain. Le courant cesse alors de se manifester sous la forme de l'arc ; la chaleur se propage, et on abaisse graduellement les autres électrodes positives jusqu'à ce que la majeure partie du minerai soit soumise à l'action électrique. La force électromotrice est ramenée alors à 50 volts, et il ne reste plus qu'à maintenir, à la température la moins élevée possible, le bain en fusion pendant deux ou trois heures.

On laisse ensuite refroidir le creuset dont le contenu est broyé et lavé : le métal se présente en lingots, le fluorure de sodium se dissout, et le minerai non réduit est repris pour être traité.

Dans une expérience exécutée à Londres par M. John Hopkinson, on a obtenu 3 grammes d'aluminium par cheval-heure.

Procédé Minet. — M. Minet, à l'usine de Creil, emploie le mélange suivant :

33 p. 100	fluorure double d'aluminium et de sodium,
66 —	chlorure de sodium.

Le mélange de ces deux sels a pour effet d'abaisser la température de fusion ; car le point de fusion du mélange de deux sels est moins élevé que celui qui est nécessaire à chacun d'eux.

Le chlorure de sodium sert à entretenir la fluidité du bain et à lui donner un niveau constant.

D'après M. Minet, le fluorure d'aluminium, qui a une chaleur de formation moindre que celle du fluorure de sodium, se décompose seul, tant que le courant n'atteint pas 15 à 20 volts et la température du bain 1 600° ; de sorte qu'en réglant convenablement la tension, on peut ne décomposer que le sel d'aluminium. Il y a là un grand avantage, d'abord à cause de la faible tension nécessaire, en second lieu en raison de la bonne utilisation du courant qui ne sert qu'à décomposer des matières utiles.

Comme nous l'avons dit en commençant, tous les corps sont

attaqués par le fluor ; il est donc très difficile de trouver une cuve convenable ; si l'on emploie un métal, il est détruit par les sels fondus dont on fait usage. Il en résulte que non seulement la pureté de l'aluminium se trouve altérée, mais l'action électrolytique devient encore impossible. En effet, supposons qu'on opère avec un récipient en fer, il se formera du fluorure de fer, et comme la formation de ce sel exige 50 à 60 calories, tandis que le fluorure d'aluminium en demande 80, il se produira ce fait, qu'au lieu de transporter sur la cathode de l'aluminium, on y déposera le fer du récipient.

Afin d'empêcher cet effet de se produire, M. Minet a eu l'idée de relier le métal de la cuve en dérivation à la cathode ; sur ce circuit il interpose une résistance calculée de manière que la cuve ne reçoive que 5 p. 100 du courant total. Cette disposition est représentée sur la figure 230. Le dépôt d'aluminium se partage donc dans une certaine proportion entre la cathode et le récipient qui se trouve ainsi protégé.

Les électrodes sont faites en charbon, et l'aluminium vient s'accumuler dans une auge placée en bas de la cathode. La cuve est en fonte, elle est chauffée extérieurement et à feu nu.

Si au lieu d'aluminium pur on veut obtenir un bronze ou un alliage de ce métal, on dispose l'opération comme l'indique la figure 231. Dans ce cas, la cuve est constituée avec le métal qui doit entrer dans l'alliage, et elle sert elle-même de cathode.

En ajoutant au bain de l'alumine ou de la bauxite (alumine hydratée mélangée d'oxyde de fer), M. Minet est arrivé à réduire la consommation de fluorure d'aluminium. Cette matière absorbe, en effet, une partie des vapeurs de fluor et régénère le fluorure. Pour obtenir 100 kilogrammes d'aluminium, on dépense :

150 kg.	fluorure d'aluminium,
200 —	alumine,
100 —	chlorure de sodium.

L'électrolyse exige 5 volts. Voici les résultats actuels :

On obtient 18 kilogrammes d'aluminium pur en dépensant comme énergie électrique 40 chevaux-vapeur pendant vingt heures, soit 22,5 grammes d'aluminium pur par cheval-heure. M. Minet

pense arriver à 35 grammes par cheval-heure. La théorie, basée sur les équivalents électro-chimiques et les quantités de chaleur de combinaison, indique 40 grammes pour la production d'un cheval-heure. On voit que le résultat obtenu par M. Minet se rapproche beaucoup de ce chiffre.

Procédé Cowles. — MM. Cowles se sont attachés, non pas à produire directement l'aluminium pur, mais à l'état d'alliages plus ou moins riches avec le cuivre, le fer, etc. ; ils opèrent en réduisant directement les minerais d'aluminium, tels que le corindon ou la bauxite, par le carbone, sous l'influence du courant électrique et en présence du métal devant entrer dans l'alliage final.

Quand on essaye de supprimer le métal qui s'allie à l'aluminium, on obtient une combinaison analogue à la fonte, qui ne se prête pas aux applications.

L'action de l'électricité dans cette opération n'est pas encore parfaitement déterminée. Y a-t-il électrolyse ou simplement dissociation de l'alumine, due à la haute température développée par le passage du courant? Cette seconde hypothèse est la plus probable, car les résultats obtenus dans la pratique ne concordent pas avec ceux que donne la théorie si l'on suppose qu'il y a électrolyse.

Le procédé Cowles est actuellement employé dans deux usines, à Lockport, New-York, et à Stoke-on-Trent, Angleterre; nous allons décrire rapidement l'installation de cette dernière. Elle comprend une machine à vapeur de 650 chevaux, qui actionne une dynamo établie pour fournir un courant de 5 000 à 6 000 ampères avec une force électromotrice de 50 à 60 volts.

La salle des fours est divisée en deux ateliers contenant chacun six fours. L'un de ces ateliers est réservé à la fabrication des bronzes d'aluminium et autres alliages contenant du cuivre ; l'autre à la fabrication du ferro-aluminium, ferro-chromium, etc. Les six fours sont placés l'un à côté de l'autre au niveau du sol.

Chaque four est formé par une cuve rectangulaire en briques réfractaires, ayant $0^m,60$ de largeur, $1^m,40$ de longueur et $0^m,50$ de profondeur. A chaque extrémité est une petite voûte qui laisse passer un tuyau en fonte fixé à la tête du four ; c'est dans ce tuyau

une [illegible] comme un piston dans un cylindre, la pièce qui [illegible] dans un [illegible] fondu, les charbons formant l'électrode. Les charbons sont au nombre de 9 pour chaque électrode; ils ont [illegible] centimètres de diamètre.

Le chargement du four et la conduite de l'opération se font de la manière suivante : on fait au fond du four une brasque en charbon granulé et chauffé de quelques centimètres, suffisante pour isoler la paroi du four de l'action de la chaleur. On emploie du charbon chauffé, c'est-à-dire traité par un lait de chaux très clair, pour augmenter sa résistance électrique : sans cette précaution, le charbon se transformerait en graphite et deviendrait bon conducteur. On rapproche ensuite les électrodes à 5 ou 6 centimètres [illegible] et l'on place un gabarit en tôle mince qui laisse un espace rectangulaire libre pour la charge au centre du fourneau, et permet de faire une brasque de 6 à 8 centimètres d'épaisseur entre la feuille de tôle et la paroi du four. Quand cette brasque est faite, on met entre les électrodes, dans l'espace vide qu'elles laissent entre leurs extrémités, des fragments de charbon provenant de débris de crayons électriques, et l'on a bien soin de recouvrir les extrémités encastrées des électrodes de poussiers de charbon chauffé et bien damé, en réservant libre tout l'espace destiné à recevoir l'action du courant. C'est dans cet espace que l'on met la charge; elle se compose actuellement, pour le bronze d'aluminium, de 70 kilogrammes de cuivre et de 37 à 40 kilogrammes de corindon, le tout mélangé de charbon concassé. Une fois la charge mise en place, on enlève le gabarit en tôle, on ajoute du poussier de charbon de bois aux deux extrémités du four et du charbon de bois concassé sur la partie occupée par la charge, afin de laisser un libre passage aux gaz qui se produisent pendant la réaction. On ferme alors le four avec une plaque en fonte, au sommet de laquelle est une ouverture de 0m,10 de diamètre par où s'échappent les gaz, et on lute cette plaque avec de la terre réfractaire pour empêcher les rentrées d'air.

On envoie le courant électrique dans le four. Il se dégage immédiatement de la vapeur d'eau et de la fumée; mais cela ne dure qu'un instant; les gaz se produisent ensuite peu à peu et finissent par s'enflammer au contact de l'air.

Ainsi que nous l'avons dit précédemment, les électrodes sont très rapprochées l'une de l'autre au début de l'opération. Mais, quand le four a été en marche pendant un certain temps et que la charge est devenue très chaude, la résistance électrique diminue ; on éloigne alors les électrodes pour maintenir la résistance. L'ouvrier chargé de la conduite du four se règle pour cela sur les indications d'un ampèremètre placé en circuit, et sur la sortie des flammes.

Chaque opération dure environ une heure et demie ou deux heures au maximum ; on n'a pas intérêt à la prolonger et l'on obtient le maximum de rendement dans ce laps de temps. On arrête le courant plus ou moins tôt suivant que le dégagement de gaz a été rapide et abondant, ou qu'il s'est produit avec lenteur.

On laisse ensuite refroidir le four et on le vide. Le bronze produit est mis à part et examiné ; l'état de sa cassure permet d'estimer très exactement sa teneur en aluminium. On a ainsi un alliage riche, contenant en moyenne de 14 à 20 p. 100 d'aluminium.

Dans une opération telle qu'elle vient d'être décrite, ayant duré une heure et demie, on a obtenu 90 kilogrammes d'alliage renfermant 14 p. 100 environ d'aluminium, soit 12,6 kilogrammes d'aluminium, avec un courant moyen de 4 250 ampères et 60 volts, ce qui donne :

8,4 kg.	d'aluminium	par heure	pour	255 000	watts
1 —	—	—	—	30 300	—

Une autre opération a fourni 85 kilogrammes d'alliage à 15 p. 100 en une heure quarante minutes, soit 12,75 kilogrammes d'aluminium, avec un courant moyen de 4 800 ampères et 57 volts, ce qui donne :

7,65 kg.	d'aluminium	par heure	pour	273 600	watts
1 —	—	—	—	35 760	—

En résumé, avec une dynamo de 400 chevaux comme celle en fonctionnement à Stoke-on-Trent, on obtient, allié au cuivre, 1 kilogramme d'aluminium pour 44 à 48 chevaux-heure. Il est à remarquer que le rendement augmente avec la puissance de la machine.

L'alliage riche à 15 p. 100 est refondu, et l'on y ajoute approximativement la quantité de cuivre que l'on juge nécessaire pour obtenir du bronze à 10 p. 100 ou du bronze renfermant de plus faibles quantités d'aluminium, suivant les demandes de l'industrie métallurgique. Le métal fondu et bien écumé, l'ouvrier en coule une petite quantité sur la plaque en fonte du fourneau ; suivant la manière dont cet échantillon se conduit quand on le ploie, ou suivant le grain de sa cassure, on en déduit la quantité de cuivre qu'il est nécessaire d'ajouter. Lorsque cet essai préliminaire fournit des résultats satisfaisants, on prélève une éprouvette d'essai, que l'on coule dans un moule en sable et qui donne de petits lingots dont on mesure la résistance à la rupture. Si le chiffre trouvé est trop élevé et que l'allongement soit trop faible, on ajoute encore du cuivre et l'on fait un nouvel essai, jusqu'à ce que l'on ait obtenu la résistance cherchée avec l'allongement correspondant. Le métal est alors coulé en lingots, puis porté au magasin avec une note spéciale indiquant son poids, la résistance à la rupture par pouce carré de section et l'allongement pour 100. C'est ainsi que la Compagnie Cowles livre les alliages de bronze d'aluminium suivant le degré de ténacité et d'allongement; du reste l'expérience a montré que la proportion d'aluminium contenue dans l'alliage concordait toujours avec le degré de résistance.

Le même procédé s'applique à la fabrication du bronze de silicium et du ferro-aluminium. Pour avoir le bronze de silicium, il suffit de substituer au corindon du sable blanc ou du grès comme celui de Fontainebleau. Pour le ferro-aluminium, le cuivre est remplacé par des riblons de fer ou mieux de fonte.

Procédé de M. Berg. — Ce qui caractérise ce procédé, c'est qu'on ajoute au minerai d'aluminium mélangé de charbon, des nitrates ou des sulfures alcalins, dans le but de scorifier les impuretés métalliques déplacées en même temps que l'aluminium.

Dans un creuset de graphite, entre deux électrodes de charbon, on place un mélange finement pulvérisé contenant une substance aluminique, du charbon, du nitrate de potassium ou de sodium, ou bien du sulfure de potassium ou de sodium.

On opère à la tension de 20 à 50 volts avec une intensité de

1 000 à 10 000 ampères suivant la composition du mélange. Le charbon sert à rendre la masse conductrice.

L'aluminium se dépose sur la cathode, et les métaux étrangers s'oxydent ou se sulfurent sous l'influence des nitrates ou des sulfures, et passent à l'état de scorie.

Pour terminer cette étude sur l'aluminium, rappelons que ses propriétés principales sont sa faible densité, sa ductilité et son inaltérabilité à l'air. Parmi ses alliages, celui avec l'étain ($Al = 10$ $Sn = 100$) se soude facilement. Sa densité est 2,85, il est inaltérable à l'air. Parmi les alliages au cuivre, celui qui contient 6 p. 100 de cuivre a une résistance double de celle de l'aluminium, et sa densité est très faible. Le bronze à 10 p. 100 d'aluminium découvert par Debray a été proposé pour faire des coussinets et des pièces de machines. Si on l'ajoute à la fonte, dans la proportion de quelques millièmes, la fonte devient plus facile à travailler et moins sujette à se tremper, le retrait est moindre. Ajouté à l'acier, il donne de la fluidité au métal.

400. Fabrication du magnésium. — Le magnésium s'obtient par l'électrolyse d'un chlorure double de magnésium et de potassium ; ce sel se trouve en abondance à Strassfurth ; il renferme à l'état natif plusieurs équivalents d'eau. Pour éliminer celle-ci, on chauffe dans des bassines en fonte, et la disparition de l'eau s'accuse par un dégagement d'acide chlorhydrique provenant d'un commencement de décomposition du sel anhydre.

Le chlorure anhydre de magnésium et de potassium est mis dans un creuset en fer chauffé à feu nu. Le creuset est fermé par un couvercle où s'engagent des tuyaux en grès conduisant le chlore à des bonbonnes dans lesquelles il vient se dissoudre.

Dans le creuset plonge un cylindre en terre réfractaire fermé à la base et dont la paroi est percée de fenêtres vers le bas. Le sel fondu par voie ignée prend le même niveau dans le creuset et dans le cylindre. Dans ce vase plonge une anode en charbon reliée à un pôle d'une dynamo, le creuset étant attaché à l'autre pôle. Quand le courant passe, il se dégage du chlore et en même temps il se forme des globules de magnésium qui nagent dans le bain, car le

métal a presque la même densité que le sel fondu. On enlève les creusets, on rassemble ensuite le magnésium, on le sépare du résidu de scories et on le fond en pains.

401. Soudure électrique des métaux. — Pour terminer ce chapitre, nous dirons quelques mots de la soudure des métaux par l'électricité, bien que cette question ne se rattache pas directement à l'électrolyse. C'est une application très intéressante des courants électriques, et l'on peut prédire qu'elle prendra un jour un grand développement dans l'industrie.

Pour opérer une soudure, on utilise la température produite par l'arc voltaïque, qui peut s'élever jusqu'à 4 000° et qui est capable de fondre tous les métaux. Bien des essais ont été faits pour résoudre ce problème ; c'est M. Bernadoz qui en a trouvé le premier la solution pratique.

Procédé Bernadoz. — La pièce à souder est placée sur un marbre en fonte nommé *enclume électrique*, qui repose sur une table isolante.

Le marbre est mis en communication permanente avec le pôle négatif de la source électrique ; au pôle positif est fixé un conducteur souple qui se termine par un charbon adapté à une poignée isolante. L'ouvrier, tenant l'outil à la main, applique pendant une fraction de seconde la pointe de charbon sur un des bords à souder et ferme ainsi le circuit ; puis il provoque la production de l'arc, en soulevant un peu le crayon ; les métaux fondus sous l'action de cette haute température se trouvent ainsi soudés entre eux.

L'action produite est tout à fait locale, et le métal n'entre en fusion que dans les parties soumises directement à l'arc ; l'opération se fait très rapidement parce que la fusion a lieu presque instantanément.

Les pièces à souder n'ont besoin d'aucune préparation préalable ; car la présence d'un oxyde n'empêche pas la production de l'arc à cause des hautes tensions employées. Ces oxydes sont réduits, et en ajoutant un peu de sable argileux, on les transforme en scorie. Cette action réductrice produite au pôle négatif empêche l'oxydation du métal et garantit le succès de l'opération. En procédant

autrement, c'est-à-dire en plaçant le métal au pôle positif, on donne lieu à une oxydation qui gêne l'opération et l'on parvient seulement à produire des trous dans les tôles.

L'intensité et la tension du courant doivent varier nécessairement avec la nature des métaux et le genre de travail. Dans ce but, M. Bernadoz se sert d'une batterie d'accumulateurs, dont il fait varier le groupement suivant les besoins et sur le circuit desquels il peut intercaler des résistances pour compléter le réglage.

Le conducteur du pôle positif est fixé à l'enclume ou directement au métal, au moyen de pinces mobiles; celui du pôle négatif est renfermé dans un tube en cuivre rouge à l'extrémité duquel est placé le charbon dans une tenaille métallique, d'où on peut le retirer facilement. La poignée en bois du tube est entourée d'une garde métallique pour empêcher les éclats du métal d'atteindre la main de l'opérateur. Le charbon est le même que celui des lampes à arc, seulement un peu plus long.

En outre, l'opérateur tient à la main un cadre en bois muni de verres de couleur et d'une garde en carton pour protéger sa vue et sa main ; on emploie préférablement un masque en soie enduit de résine et muni d'un cadre mobile avec verres de couleur et d'ouvertures dans la visière pour la respiration. Sans ces précautions, les yeux, la peau du visage et les mains éprouvent les mêmes accidents que ceux dus à un fort coup de soleil. Il faut encore observer que, pendant le travail, la poignée en bois s'échauffe tellement qu'il est indispensable de temps en temps de plonger les tenailles dans un baquet d'eau.

Ce procédé permet de souder ensemble la fonte, le fer forgé, l'acier, le cuivre. Pour éviter l'écoulement du métal liquide, on met des morceaux de coke autour du point à souder.

La soudure peut se faire de différentes manières; voici quelques exemples de la façon d'opérer de M. Bernadoz :

1° *Bout à bout :* Ce procédé s'emploie pour les barres de fer ou les tôles très épaisses. On laisse entre les bords un espace égal à l'épaisseur des pièces ; on met sous les bouts une plaque en coke de cornue de gaz, puis dans le vide une couche de petits morceaux de fer, on approche le charbon, et le métal en fondant se soude aux deux bouts : on ajoute de nouveaux morceaux de fer jusqu'à

ce que le vide soit rempli, et l'on continue l'opération jusqu'aux bords supérieurs qui sont protégés par des morceaux de coke ; si, l'opération une fois terminée, la forme de la soudure présente des inégalités, on les régularise au marteau pendant que le fer est rouge.

Pour le cas où il faut faire la soudure dans le sens vertical, on maintient les deux feuilles dans un appareil à charnière, composé de deux parties semblables qui appliquent contre le joint de chaque côté deux demi-cylindres pleins de charbon de gaz constituant ainsi un moule dans lequel on met des morceaux de fer que l'on fond ; on remonte l'appareil à charnière au fur et à mesure de l'avancement de l'opération.

Pour les barres et les feuilles d'épaisseur moyenne, on fond d'abord le métal aux coins, de manière à former une cuvette que l'on remplit de morceaux de fer, puis on continue comme précédemment.

2° *Par recouvrement :* On dispose les feuilles ou barres l'une sur l'autre, de telle sorte que la partie en contact ait de 1,5 à 2 fois l'épaisseur de la pièce ; on présente le charbon sur l'arête de manière à la fondre ; quelquefois on pose une bande de fer pour garantir ce point, et on remplit le creux de morceaux de fer que l'on fond. On peut encore employer une bande en charbon qui brûle pendant l'opération.

On opère, par ce moyen, non seulement la soudure, mais encore la rivure des métaux. Dans ces cas les deux tôles, après avoir été percées, sont réunies par une broche métallique dont les bouts sont ensuite fondus de façon à former un rivet.

On pratique encore ce qu'on nomme le *demi-rivet électrique*. Une seule des tôles est percée, et dans le trou on fond un culot de métal.

Procédé Thomson. — M. Thomson procède d'une manière un peu différente. Il fait passer le courant à travers les deux pièces à réunir en les comprimant l'une contre l'autre. La chaleur développée par la résistance du joint suffit pour ramollir les métaux et les souder. L'effet s'augmente de lui-même dès qu'un premier échauffement s'est produit, la résistance du métal étant plus

grande à chaud qu'à froid. Ce procédé convient surtout pour les soudures bout à bout.

Pour la rivure, M. Thomson porte un rivet à l'incandescence en le faisant traverser par un courant qui le ramollit, puis les têtes sont formées par compression comme par le système mécanique.

402. — Nous avons passé en revue les principales applications de l'électricité à la métallurgie. Dans cette étude, il nous a été souvent impossible, à notre grand regret, d'indiquer des données bien précises et des résultats numériques : c'est que cette industrie n'est créée que depuis peu de temps. Il y a des procédés qui n'ont pas encore été contrôlés par une expérience assez longue, et, comme toutes les inventions trop nouvelles, ils sont encore entourés d'un certain mystère. Nous avons donc dû nous borner à donner surtout des lois générales, avec quelques exemples à l'appui. L'électro-métallurgie, dont on n'aurait pas pu soupçonner l'existence il y a quelques années, a déjà fait de grands progrès ; elle n'a pas dit son dernier mot, et nous ne croyons pas trop nous avancer en prédisant que l'électricité trouvera là une de ses plus belles applications. Autrefois, la chaleur seule était employée dans le traitement des minerais, plus tard la chimie lui a prêté son concours. Mais si l'électricité, produite d'une manière économique par l'utilisation des forces de la nature, vient apporter son aide à ces deux puissants agents, la fabrication des métaux entrera dans une ère toute nouvelle, et certains métaux qui semblent encore destinés à rester éternellement dans les laboratoires, seront exploités d'une façon pratique ; la fabrication des alliages d'aluminium en est un exemple frappant.

SIXIÈME PARTIE

TÉLÉPHONIE

THÉORIE ET DESCRIPTION DES TÉLÉPHONES

403. Théorie du téléphone. — Le téléphone est certainement une des applications les plus heureuses et les plus originales de l'électricité. Il permet de reproduire distinctement à des distances énormes les moindres articulations de la voix, et offre le plus frappant exemple de la rapidité avec laquelle les inventions réellement utiles se propagent dans le monde entier. Inconnu il y a quinze ans, il s'est aujourd'hui rendu indispensable aux industriels, aux commerçants, en un mot à toutes les personnes pour lesquelles le temps a de la valeur. Comme nous voulons l'étudier non pas au point de vue de la science, mais pour ses applications industrielles seulement, nous ne nous attarderons pas à donner l'historique de cette invention et nous décrirons immédiatement les appareils les plus usités, après avoir exposé en quelques mots les principes sur lesquels ils reposent.

C'est sur les courants d'induction qu'est basée l'action du téléphone. Nous avons décrit ces phénomènes au commencement de cet ouvrage ; nous allons les rappeler brièvement.

Si l'on fait mouvoir le pôle d'un aimant à proximité d'un fil métallique formant un circuit fermé, on détermine dans ce fil un courant dont le sens change suivant qu'on approche ou qu'on éloigne l'aimant.

Si, au lieu d'agir sur un simple circuit, l'aimant exerce son action sur une bobine contenant un nombre considérable de tours et possédant dans son intérieur un noyau de fer doux, l'effet est beaucoup augmenté.

Les mêmes phénomènes s'observent si, en supposant l'aimant fixe et placé dans l'intérieur de la bobine, on modifie l'intensité du champ magnétique qu'il développe, en faisant osciller devant ses pôles l'armature de fer doux. On produit ainsi dans la bobine des courants induits, dont le sens varie suivant que l'armature s'approche ou s'éloigne, et dont l'intensité dépend de l'amplitude et de la rapidité du mouvement. On conçoit donc que, si une plaque mince de fer doux vibre en face de l'aimant sous l'influence d'un son quelconque, ses vibrations engendreront dans la bobine des courants induits, qui varieront de sens et d'intensité suivant les oscillations de la plaque. Un galvanomètre interposé dans le circuit exécutera une série de mouvements de va-et-vient ; un appareil enregistreur tracera une courbe ondulatoire qui représentera en quelque sorte les vibrations sonores ; enfin, si dans le circuit on intercale une bobine semblable à la première, contenant comme elle un aimant et placée en face d'une plaque mince de fer, les courants engendrés dans la première bobine agiront sur la seconde, et la lame de fer exécutera dans cette dernière une série de vibrations analogues à celles qui sont communiquées au premier diaphragme. On pourra donc ainsi reproduire le son. Telle est l'explication du téléphone. L'appareil devant lequel on parle a reçu le nom de *transmetteur*, celui qui reproduit la voix est le *récepteur*.

Le phénomène de la transmission de la parole est, en réalité, plus complexe et la théorie que nous venons d'exposer a donné lieu à de nombreuses discussions ; il faut reconnaître que la lumière n'a pas encore été faite complètement sur la question.

Nous avons admis que les renforcements et les affaiblissements successifs des courants induits dans le transmetteur produisaient dans le récepteur des variations de puissance magnétique, qui se traduisaient par des attractions plus ou moins grandes de la plaque vibrante. Mais il faut remarquer que les courants produits sont d'une faiblesse extrême, et il est peu probable que, s'ils agis-

saient seuls, les vibrations imprimées à la plaque de fer seraient capables de reproduire un son. M. Bréguet a obtenu des sons avec des plaques de 15 centimètres d'épaisseur et M. Ader en a produit sans plaques.

On a donc lieu de supposer qu'il se passe entre les différents organes de l'appareil des actions réciproques, qui, en agissant simultanément, concourent à renforcer l'effet de la plaque vibrante. Ces phénomènes sont encore bien obscurs ; nous ne pouvons que les signaler provisoirement. Nous pensons d'ailleurs que l'explication que nous avons donnée précédemment suffit pour faire comprendre le fonctionnement de l'appareil.

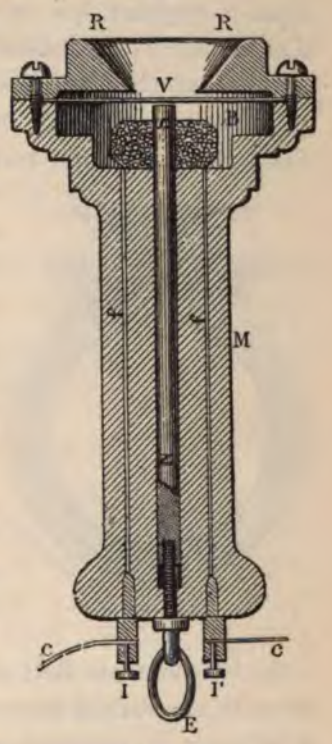


Fig. 232.

404. — Nous avons vu comment les aimants sont employés pour la transmission de la voix. Le même effet peut être obtenu en utilisant les courants fournis par une pile. De là résulte la classification suivante :

1° Téléphones magnétiques ;

2° Téléphones à piles.

Dans le premier système, le transmetteur est semblable au récepteur, et il n'est pas nécessaire d'employer un autre appareil. Dans le système à piles, les appareils qui produisent le son ne sont pas analogues à ceux qui le reçoivent, et l'installation de chaque poste comprend deux appareils différents.

405. Téléphones magnétiques. Système Bell. — Le téléphone magnétique de Bell (fig. 232) consiste en un barreau aimanté NS, à l'extrémité duquel est enroulée une petite bobine B ; en face, est placée une lame vibrante V en fer doux très mince. Le tout est contenu dans une gaine en bois ou en ébonite, dont une extré-

44. Téléphone Ader. — Bien que l'appareil Ader soit plutôt destiné à servir de récepteur quand on emploie les transmetteurs à pile que nous examinerons plus loin, il peut, comme celui de Bell, jouer le rôle de transmetteur.

M. Ader a cherché à surexciter les effets magnétiques qui déterminent les vibrations des téléphones. Pour que l'action d'un

aimant sur son armature soit maxima, il faut qu'ils aient tous les deux la même masse. Donc, dans un téléphone comme ceux que nous avons décrits, on n'utilise pas toute la force magnétique de l'aimant. Pour y arriver, il faudrait augmenter la masse de la lame vibrante, ce qui ne pourrait se faire qu'aux dépens des vibrations obtenues. C'est dans ce but que M. Ader a ajouté une seconde armature circulaire en fer doux, qui est fixe et produit l'effet de surexcitation cherché sans nuire à la légèreté du diaphragme.

Son téléphone (fig. 233) se compose d'un aimant en fer à cheval A, dont les deux pôles sont placés à côté l'un de l'autre et sont entourés par deux bobines de fil fin B, B mises en communication avec le circuit par deux bornes.

De l'autre côté de la plaque est disposée l'armature excitatrice en fer doux X. Les bobines sont contenues dans une boîte en ébonite munie d'une embouchure. Le fer à cheval sert pour suspendre le téléphone ou pour le tenir à la main.

407. Téléphones à piles. Microphones. — Comme nous l'avons vu précédemment, les vibrations sonores, en agissant sur le diaphragme d'un téléphone magnétique, développent dans la bobine et, par suite, dans le circuit téléphonique des courants induits. C'est une transformation du travail de la voix, et l'on conçoit qu'ils n'aient qu'une intensité limitée. Aussi, lorsque la distance devient trop grande, quand la ligne n'est pas parfaitement isolée, ces appareils ne peuvent-ils produire que des sons très faibles. On a donc cherché une combinaison permettant de transmettre la voix, non plus en produisant des courants, mais en utilisant ceux qui sont engendrés par une pile. De cette façon, on est libre de proportionner la source d'électricité aux résistances que l'on a à vaincre, et les sons reçus par le récepteur peuvent acquérir une plus grande intensité.

Les transmetteurs téléphoniques, ou microphones, reposent tous sur le même principe, qui est d'utiliser les vibrations sonores pour modifier la résistance d'un circuit renfermant une pile et, par suite, pour faire varier l'intensité du courant.

M. du Moncel avait constaté le premier, en 1856, que « l'intensité d'un courant dans un circuit complété par un interrupteur

était très modifiée suivant le degré de la pression exercée au point de contact des pièces conductrices de cet interrupteur ».

Il admettait que cet effet était dû à une dépression plus ou moins grande des deux corps à leur point de contact, d'où devait résulter une adhésion de ces deux corps sur une surface moléculaire plus ou moins étendue.

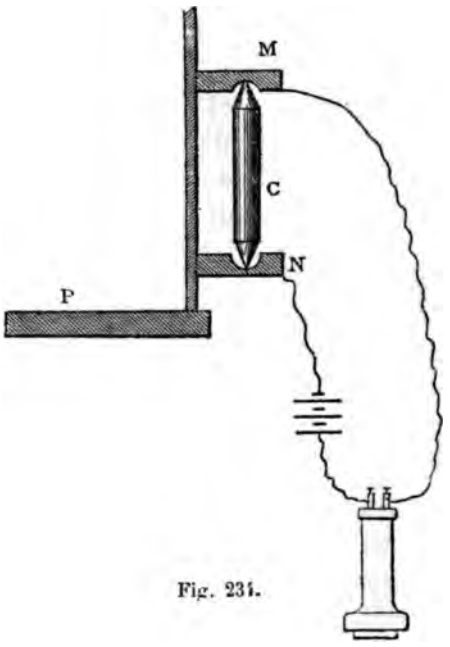


Fig. 234.

Le charbon est un des corps qui permettent le mieux d'observer ces effets; les variations de pression influent d'une façon très sensible sur sa conductibilité. Aussi est-il employé aujourd'hui d'une manière générale dans les appareils auxquels on a donné le nom de microphones.

408. Microphone de Hughes. — L'appareil de M. Hughes (fig. 234), qui fut le premier transmetteur microphonique, consiste en un petit crayon de charbon de cornue C, taillé en pointe à ses deux extrémités et maintenu verticalement entre deux godets M, N également en charbon, qui sont fixés à une table d'harmonie posée sur un plateau P. Les godets sont attachés aux extrémités d'un circuit renfermant une pile et un téléphone récepteur semblable à un de ceux que nous avons décrits précédemment. La moindre vibration produite en P se transmet entre les extrémités du crayon. La résistance aux points de contact passe donc par une série de variations qui influent sur l'intensité du courant et produisent un son dans le récepteur. Cet appareil est d'une grande sensibilité, et beaucoup de sons que l'on ne pourrait saisir sans son intermédiaire, deviennent, grâce à lui, perceptibles. C'est ainsi que le mouvement d'une montre, la marche d'un insecte ou la pointe d'un pinceau

que l'on promène sur le plateau P, produisent un son parfaitement distinct dans un téléphone qu'on applique à son oreille à une grande distance du microphone.

Tel est le principe sur lequel reposent les transmetteurs microphoniques employés aujourd'hui.

Edison a apporté dans leur application une modification qui permet d'augmenter encore la distance à laquelle on peut transmettre les vibrations sonores. Au lieu d'envoyer dans la ligne le courant même de la pile, Edison le fait circuler dans le gros fil d'une bobine d'induction, et c'est le fil fin qui communique avec la ligne. De cette façon, le circuit primaire, qui est influencé par le transmetteur, ne comprend que la pile, le charbon et la grosse bobine. Le circuit secondaire est formé par la ligne, le récepteur et le fil fin de la bobine. Le transmetteur agit donc sur une très faible résistance et conserve son action. En outre, les courants engendrés dans le fil fin prennent une tension très forte qui leur permet de surmonter de grandes résistances.

Nous allons examiner maintenant les systèmes de transmetteurs les plus employés et voir comment on leur a adapté les dispositions que nous venons de décrire.

409. Transmetteur à charbon Edison. — Le transmetteur d'Edison (fig. 235) se compose d'un disque en charbon grand comme une pièce d'un franc et supportant une petite plaque de platine surmontée d'un bouton en ivoire. Le charbon est maintenu par une vis qui permet de l'avancer à volonté. Le tout est contenu dans une boîte en ébonite qui se termine par une embouchure. En avant est placée une lame vibrante qui vient appuyer sur le petit bouton d'ivoire.

Les mouvements de la lame se transmettent au charbon par l'intermédiaire de la petite plaque de platine, et y produisent des pressions variables qui modifient la résistance électrique du charbon et déterminent, par suite, des variations d'intensité dans le courant.

Pour compléter l'appareil, il faut y ajouter une petite bobine d'induction dont le rôle a été indiqué précédemment. Le courant de la pile agit sur le gros fil, et le fil fin est mis en communication avec la ligne.

410. Transmetteur Ader. — Le transmetteur Ader se compose de trois traverses de charbon *a*, *b*, *c* (fig. 236) disposées parallèlement et supportant entre elles dix petits cylindres E de même substance. Ces cylindres sont terminés à leurs extrémités par des tourillons qui s'engagent avec beaucoup de jeu dans des trous percés dans les traverses. Les traverses extrêmes *a*, *c* sont reliées aux pôles de la pile. Les cylindres sont donc réunis deux en tension et cinq en quantité. Toutes ces pièces sont portées par une lame vibrante faite en bois mince et disposée en pupitre. La bobine d'induction est placée dans l'intérieur de l'appareil.

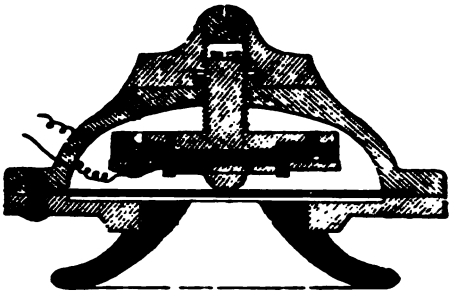


Fig. 235.

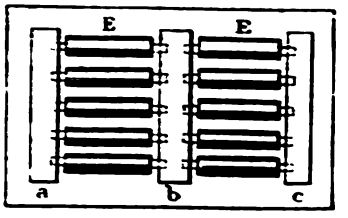


Fig. 236.

411. Poste téléphonique Ader. — Le poste comporte un transmetteur, deux récepteurs, une sonnerie, une pile et des commutateurs.

Voici, en effet, le programme que l'on a à remplir :

Deux postes étant réunis par une ligne, il faut que la sonnerie de chaque poste soit libre de fonctionner à un appel ; et la personne appelée doit, en mettant ses récepteurs à l'oreille, rompre la communication de la ligne avec sa sonnerie et l'établir avec ses récepteurs. Quand la conversation est terminée, les récepteurs sortent à leur tour du circuit, et la sonnerie y rentre.

Dans ce but, l'un des crochets auxquels on suspend les récepteurs constitue un levier mobile et sert de commutateur. Quand le récepteur est accroché, il abaisse par son poids le levier, qui ferme le circuit de la sonnerie et ouvre celui du récepteur. Lorsqu'on décroche le récepteur, le levier bascule sous l'action d'un ressort de rappel ; il ferme ainsi le circuit du récepteur et ouvre celui de la sonnerie. Dans ce but, le levier porte à son extrémité

arrière une petite plaque de cuivre isolée du corps même de la pièce et qui, dans les mouvements de bascule, vient frotter sur deux contacts rattachés au circuit.

Les figures théoriques 237 et 238, qui se rapportent à un seul et même poste, montrent la marche du courant dans les deux cas.

Dans la figure 237, le récepteur est supposé accroché, et le levier ferme, comme on le voit, le circuit de la sonnerie. Un courant venant par la ligne du poste n° 2 suit le trait plein dans la direc-

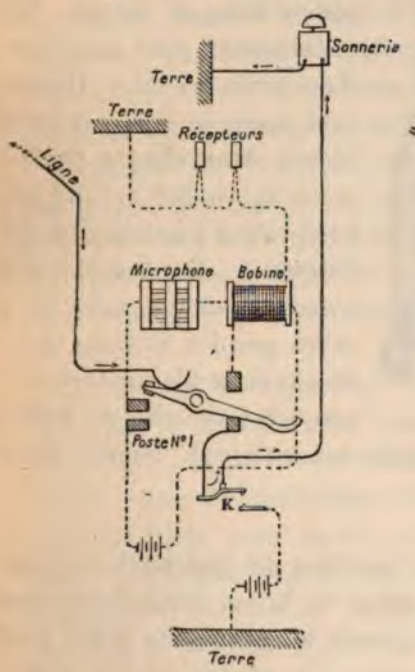


Fig. 237.

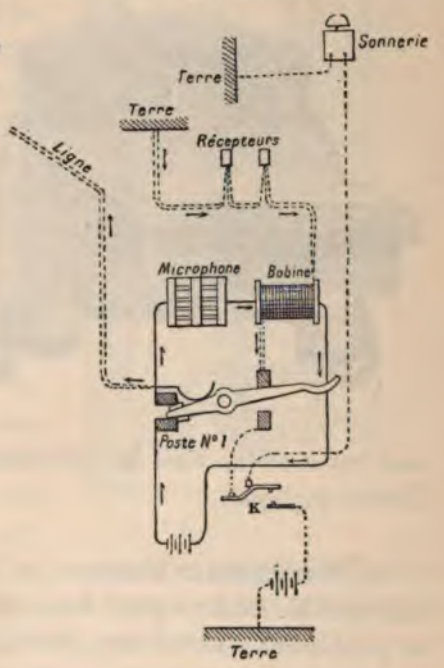


Fig. 238.

tion des flèches ; la sonnerie du n° 1 peut donc être actionnée par un appel fait au n° 2.

Réciproquement, en appuyant sur le bouton K, on envoie dans la ligne le courant de la pile n° 1, et la sonnerie du n° 2 est mise en mouvement. En même temps la sonnerie du n° 1 est placée hors circuit.

Dans la figure 238, le récepteur est décroché. Le levier s'est relevé ; et, dans ce cas, il ferme le circuit comprenant le micro-

phone et sa pile, grâce à la petite plaque de contact qu'il porte à son extrémité arrière et dont le jeu a été décrit plus haut.

Le courant inducteur, partant ici de la pile du microphone du poste n° 1, traverse le circuit indiqué en traits pleins, il passe par le microphone et le fil inducteur de la bobine. De son côté, le courant induit suit à partir de terre le chemin marqué en doubles traits pointillés ; il traverse les récepteurs du n° 1 et le fil induit de la bobine, et se dirige vers la ligne. Comme à ce moment le poste n° 2 se trouve dans la même disposition, ses récepteurs sont aussi placés dans le circuit. La conversation peut avoir lieu d'un poste à l'autre. Quant à la sonnerie, elle est hors circuit dans chaque poste.

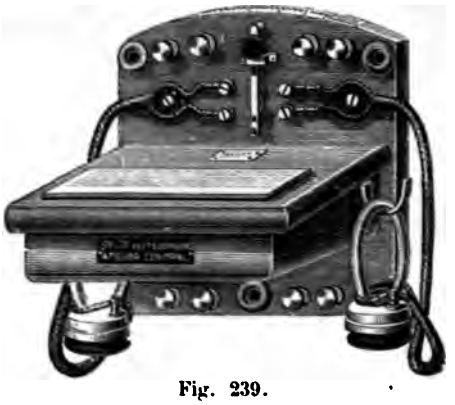


Fig. 239.

La figure 239 montre en perspective l'installation de l'appareil. Les récepteurs placés de chaque côté sont reliés par des cordons contenant deux fils conducteurs souples. Le crochet de droite seul est mobile ; c'est lui qui sert de commutateur, comme nous l'avons expliqué.

412. Transmetteur Blake. — Le système de transmetteur imaginé par M. Blake a pour but d'éviter les bruits désagréables qui se produisent souvent avec les appareils téléphoniques et que l'on désigne sous le nom de *crachements*. Ces effets sont dus généralement à des contacts imparfaits entre les surfaces du charbon. Nous avons vu que, dans les appareils d'Ader, les charbons sont disposés de telle sorte que les uns sont fixes et les autres mobiles; c'est leur poids seul qui établit les contacts ; il en résulte que l'appareil est très impressionnable aux actions physiques extérieures. M. Blake a combiné son transmetteur de manière à avoir deux organes mobiles, qui sont toujours légèrement en contact et qui sont indépendants du diaphragme. Le charbon (fig. 240) est porté par un ressort *d* présentant à son extrémité une masse pesante *gh*

qui, par son inertie, maintient le charbon à sa place et limite ses mouvements. Le ressort est relié à une pièce métallique F disposée verticalement et soutenue elle-même par un ressort *j*. Une vis *l*, que l'on peut manœuvrer de l'extérieur, permet de faire varier la distance de F au diaphragme et, par suite, de régler l'appareil.

Le contact, du côté de la lame vibrante, est formé par un petit grain de platine ayant 1 millimètre de diamètre sur 1,5 millimètre de longueur ; un ressort *c* l'applique contre le charbon, et c'est sur ce grain qu'appuie le diaphragme *m*.

L'appareil disposé verticalement est percé d'une embouchure E, et possède une bobine d'induction *i*, comme les transmetteurs que nous avons précédemment passés en revue.

Comme on le voit, dans cet appareil, la pression des deux pièces de contact reste constante, quand même le diaphragme n'y toucherait pas. Aussi ne s'y produit-il pas de crachements dus aux ruptures et aux rétablissements brusques des courants. Le système Blake est fort employé en Angleterre, en Amérique et en Belgique.

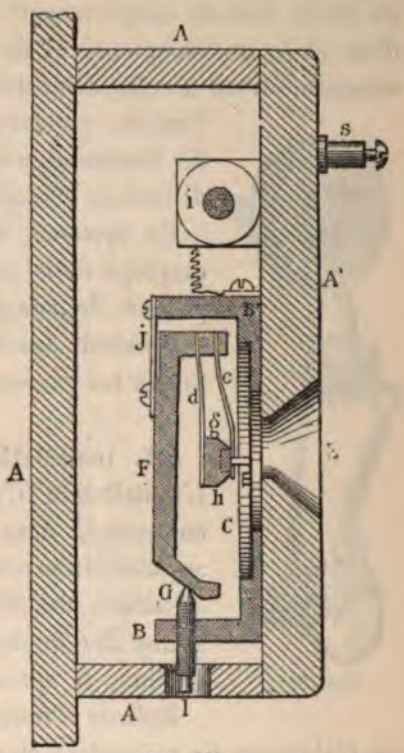


Fig. 240.

413. — Quand on se sert de téléphones magnétiques, comme ceux de Bell, chaque station ne comporte qu'un seul appareil ; car nous avons vu que dans ce système le transmetteur peut jouer le rôle de récepteur. Il suffit donc de placer, à chaque extrémité de la ligne, un téléphone de cette espèce. Il faut cependant y ajouter une sonnerie d'appel et une pile destinée à cette sonnerie.

Mais le plus généralement on emploie un microphone ; un poste comprend alors, en outre de la pile et de la sonnerie, un trans-

metteur et un récepteur. Edison, pour éviter cette complication, a songé à réunir les deux appareils en un seul. La figure 241 représente l'appareil construit par la Société générale des téléphones de Paris. Sur un même ressort, qui sert de poignée, sont adaptés, d'un côté, un récepteur, et de l'autre côté, un transmetteur à charbon. Grâce à cette disposition, le récepteur peut être placé à l'oreille, pendant que la bouche se trouve en face du transmetteur. La bobine d'induction est en dehors de l'appareil.

Fig. 241.

Ce système d'une grande simplicité est fort employé dans les bureaux centraux de Paris. Il permet de simplifier le matériel qui, sans cela, deviendrait encombrant, et il se prête très bien à toutes les exigences du service.

414. Installation d'un poste téléphonique. — L'installation d'un poste téléphonique ordinaire comprend, comme nous l'avons vu, outre les appareils transmetteur et récepteur que nous venons d'étudier, certains éléments essentiels dont nous allons dire quelques mots : ce sont la bobine d'induction, la sonnerie et la pile.

Bobines d'induction. — Les bobines employées en téléphonie ne présentent rien de particulier ; les deux fils sont enroulés l'un sur l'autre, autour d'un noyau formé d'un faisceau de fils de fer. Le fil primaire de la bobine Ader, de 0,5 millimètre de diamètre, a généralement une résistance de 1,5 ohm ; le fil secondaire, de 0,14 millimètre de diamètre, a environ 150 ohms de résistance. Mais ces chiffres n'ont rien d'absolu et peuvent varier suivant la longueur de la ligne.

Sonneries. — Durant tout le temps qu'on ne parle pas dans le téléphone, la sonnerie communique avec la ligne et est prête à recevoir l'appel qui peut venir de l'autre poste. Pendant les conversations, elle est retirée du circuit au moyen du commutateur dont nous avons parlé § 411.

Le plus généralement, la sonnerie du poste appelé est mise en mouvement par le courant d'une pile placée au poste appelant. Nous

n'avons pas à en donner la description, car elle est identique à toutes les sonneries électriques. Avec cette disposition, la pile doit avoir une force électromotrice assez élevée, qui varie d'ailleurs

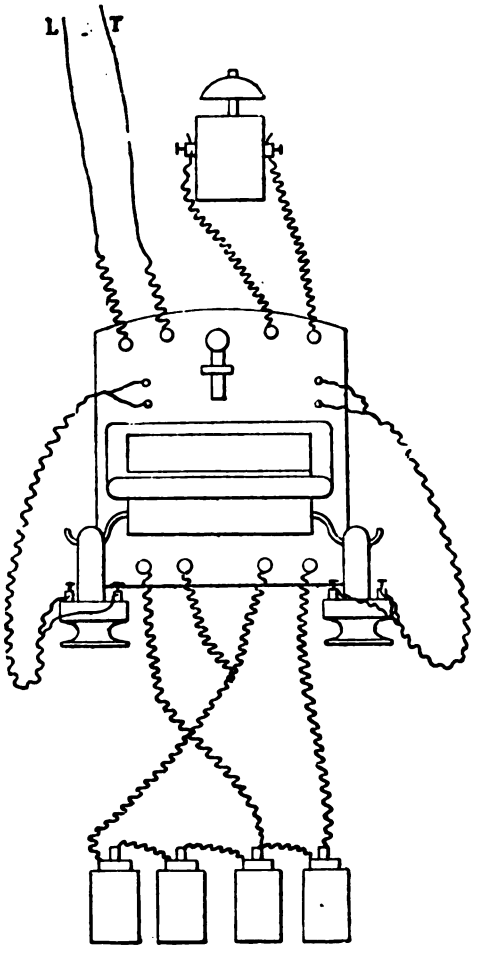


Fig. 242.

avec la longueur de la ligne et la résistance de la sonnerie, et le nombre d'éléments à employer est plus grand que si la pile alimentait seulement le transmetteur à charbon. C'est le système adopté en France.

Dans certains pays, la Belgique et la Suisse, par exemple, la sonnerie ne fonctionne pas sous l'influence d'un courant voltaïque ;

on emploie des appareils particuliers à courants induits ; de cette façon, le nombre d'éléments de la batterie se trouve réduit à ceux du microphone.

Ces sonneries électro-magnétiques, appelées *magneto-calls*, sont de petites machines magnétos, dans lesquelles le mouvement de rotation de l'anneau est imprimé à la main. Cet anneau est placé entre les pôles d'un ou de plusieurs aimants, et sa rotation donne naissance à des courants induits qui sont envoyés sur la ligne et actionnent la sonnerie du poste récepteur.

Piles. — Comme, dans un poste téléphonique, la pile ne travaille pas d'une façon continue, elle n'a pas besoin d'être absolument impolarisable. Les éléments le plus généralement employés sont du système Leclanché ; les piles de Lalande et Chaperon peuvent être aussi appliquées ; elles évitent en effet les soins d'entretien et de nettoyage qu'il faut donner de temps en temps aux éléments Leclanché. Les postes Ader sont ordinairement montés avec six ou neuf éléments en tension, qui sont placés sur la sonnerie, et dont trois seulement sont sur le microphone. Avec le système Blake, à appel magnéto-électrique, un seul élément est suffisant.

L'installation d'un poste téléphonique est, en résumé, facile à faire ; nous donnons dans la figure 242 le croquis d'un poste du système Ader.

RÉSEAUX ET LIGNES TÉLÉPHONIQUES

415. — L'établissement des communications téléphoniques, fort simple lorsqu'il ne s'agit que d'une seule ligne, devient très compliqué quand il faut relier un grand nombre d'habitants d'une même ville et mettre chacun d'eux en état de correspondre à sa volonté avec tous les autres. C'est ce qu'on appelle un *réseau téléphonique*.

Pour construire un réseau, on établit un *bureau central* où aboutissent toutes les lignes des abonnés. Là sont placés des employés spéciaux, dont le rôle est de relier momentanément les lignes des abonnés qui désirent parler entre eux, et d'interrompre cette communication aussitôt que la conversation est terminée.

Quand le réseau n'est pas fort étendu, un bureau central unique est suffisant ; mais dans une grande ville comme Paris,

la longueur de certaines lignes serait telle que le prix d'établissement rendrait l'exécution commercialement impossible. On est alors obligé de diviser la ville en plusieurs réseaux particuliers, ayant chacun leur bureau central, et ces bureaux centraux sont reliés entre eux par des lignes qu'on appelle *auxiliaires ;* le nombre de ces dernières est déterminé d'après la fréquence des communications échangées.

416. Installation des lignes souterraines. — Les lignes téléphoniques sont presque toujours aériennes ; mais il y a actuellement une tendance à peu près générale à les placer sous terre. Paris est la seule ville où, grâce à la canalisation des égouts, elles aient pu être disposées de cette manière dès le début de la téléphonie. Nous allons décrire rapidement l'installation de ce réseau.

Les lignes souterraines de Paris sont réunies dans des câbles recouverts de plomb. Chaque câble contient 14 conducteurs de cuivre isolés les uns des autres, constituant 7 lignes doubles d'abonnés.

Elles sont doubles parce que l'on a dû employer pour chaque ligne un fil d'aller et un fil de retour, afin d'éviter les effets nuisibles d'induction dont nous parlerons plus loin. Chaque conducteur est formé de 3 brins de fil de cuivre ayant 0,5 millimètre de diamètre et tordus ensemble ; il présente une résistance de 30 ohms par kilomètre ; son isolement, produit par de la gutta-percha, est environ de 4 440 megohms.

Les câbles de 14 conducteurs sont portés par des crochets à trois anses scellés dans la voûte des égouts. Chaque anse renferme 17 câbles ; il y a donc en tout 51 câbles par crochet, soit 357 lignes.

417. Bureau central avec tableaux à Jack-Knives. — Les câbles dont nous venons de parler pénètrent dans le bureau central et arrivent dans une guérite en bois de forme carrée, sur les faces de laquelle existent des ouvertures circulaires ou rosaces. Les sept lignes de chaque câble se séparent dans cette guérite et viennent aboutir à des serre-fils placés en cercle autour de la rosace ; sur un cercle plus grand sont disposées de petites plaques en corne

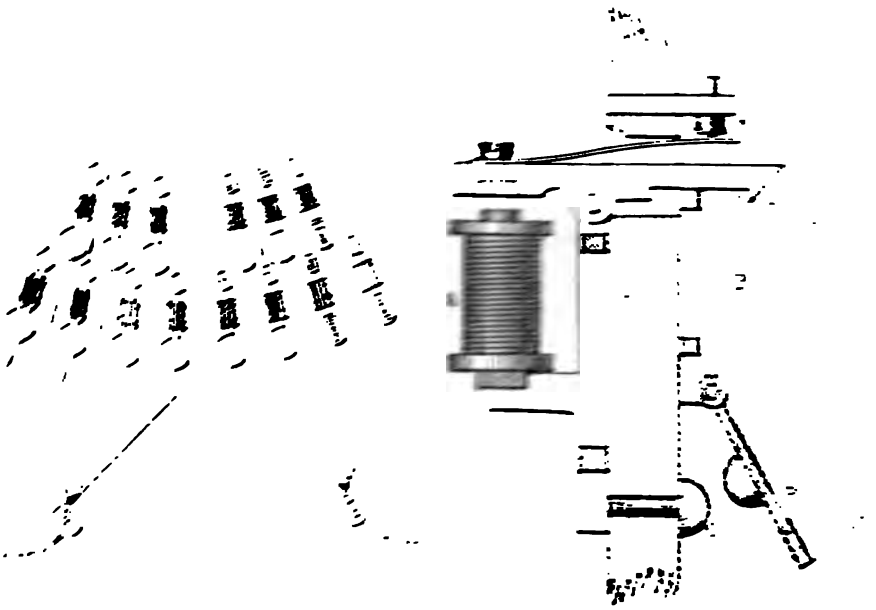


Fig. 244. Fig. 245.

Suivons maintenant la double ligne d'un abonné : elle arrive d'abord à un indicateur destiné à désigner le numéro de l'abonné qui appelle le bureau. Cet indicateur comprend un électro-aimant A (fig. 244) traversé par le courant de la ligne, dont l'armature, mobile autour d'un axe O, en est maintenue écartée à l'état de repos, un ressort r sert à régler cet écartement. Le crochet qui termine l'armature retient une petite plaque P qui cache le numéro

l'abonné. Lorsqu'un appel se produit, l'armature est attirée, la que P tombe et découvre ce numéro. En même temps, le bouton tallique P touche un autre bouton C, et leur contact ferme un cuit local, sur lequel est une sonnerie qui prévient les employés bureau. Cette sonnerie est d'ailleurs commune à un grand mbre de lignes.

Les indicateurs sont groupés par tableau de 25 (fig. 245); au-ssous sont placés 25 commutateurs correspondants destinés à

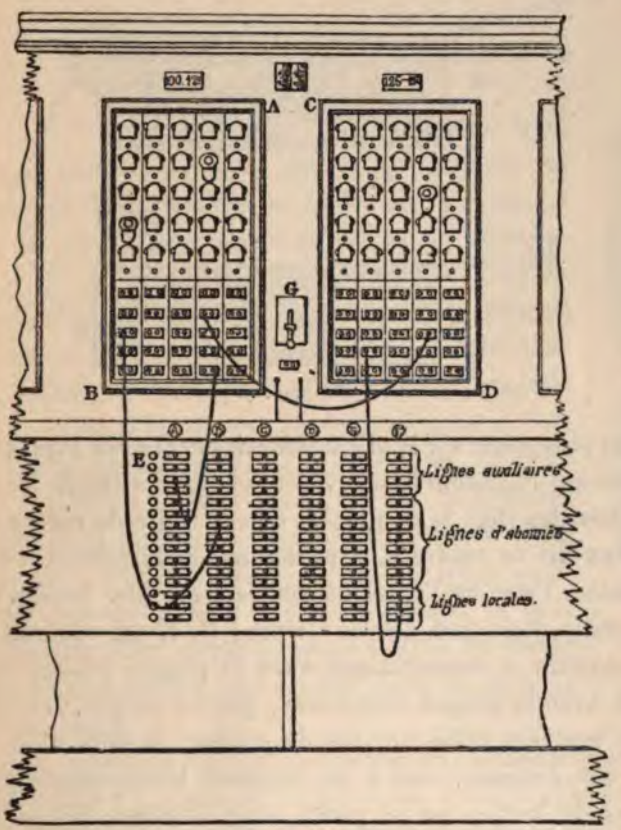


Fig. 245.

ablir les communications téléphoniques entre les abonnés. Ces mmutateurs sont un peu différents suivant que les lignes com-ennent un seul ou deux fils; nous allons décrire l'appareil opté dans le dernier cas.

Les appareils employés à Paris, auxquels on a donné le nom

de *jack-knife*, mais qu'il serait plus naturel d'appeler commutateurs à ressort, se composent de deux plaques de laiton juxtaposées, mais isolées l'une de l'autre et communiquant respectivement avec les deux fils de la ligne. Elles sont représentées l'une au-dessous de l'autre dans la figure 246 pour la facilité de la démonstration ; en réalité, la plaque AB est placée devant la plaque A'B'.

Ces pièces sont percées de deux ouvertures D*d*, E*e*, dont le dia-

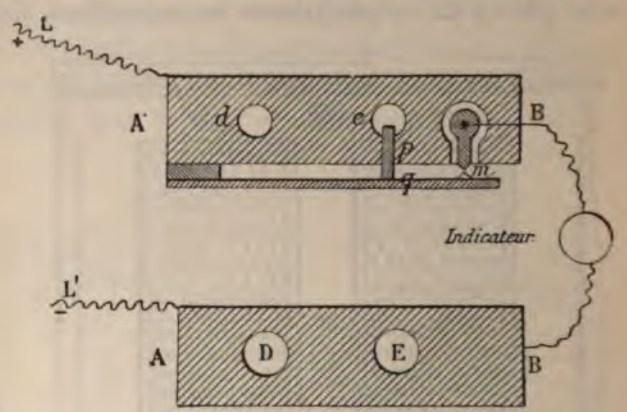


Fig. 246.

mètre est plus grand sur la plaque antérieure que sur la plaque postérieure, et qui reçoivent les chevilles destinées à établir les liaisons.

Les chevilles (fig. 247), placées à l'extrémité de cordons renfermant deux fils de cuivre *c*, *c*, présentent deux parties métalliques A, B isolées l'une de l'autre et reliées à ces fils. Lorsqu'on place une cheville dans une des ouvertures D, E du commutateur, la partie centrale A communique avec la plaque postérieure, et la partie B avec la plaque antérieure ; par ce moyen, les fils de la ligne se trouvent reliés aux fils du cordon. Il suffit alors de faire aboutir ces derniers, soit à un appareil téléphonique pour que l'employé du bureau puisse parler avec l'abonné, soit au commutateur d'un autre abonné, au moyen d'une seconde cheville, pour que les deux abonnés puissent correspondre.

Mais il est indispensable que le bureau soit prévenu de la fin des conversations et coupe la communication lorsqu'elle n'est plus nécessaire. La disposition précédente ne permet pas d'obtenir ce résultat, et l'on y est arrivé en laissant en dérivation sur la

ligne un des indicateurs des deux abonnés. Celui-ci informe alors qu'il a terminé, en pressant le bouton d'appel de son poste ; le courant ainsi produit est assez fort pour faire manœuvrer l'indicateur resté en dérivation.

Dans ce but, la plaque postérieure du commutateur porte en dessous un ressort *qm* qui, en temps normal, appuie en *m* sur une vis métallique et communique avec l'indicateur. Le courant de la ligne, arrivant en L sur la plaque postérieure, passe par le ressort *qm* à l'indicateur, et revient à la plaque antérieure d'où il retourne à la ligne en L'. C'est là le circuit d'appel.

Une fois la communication établie entre deux abonnés, il faut, avons-nous dit, supprimer un des indicateurs et laisser l'autre en dérivation. Le ressort porte, à cet effet, une goupille en ivoire *pq*, engagée normalement au trou *e* et disposée, comme l'indique la figure 246, de manière que son extrémité dépasse l'affleurement de ce trou. Pour mettre l'indicateur hors de circuit, il suffit alors d'enfoncer la cheville dans le trou E. On abaisse ainsi le ressort et l'on interrompt le circuit en *m*. Si l'on veut au contraire mettre l'indicateur en dérivation, on n'a qu'à placer la cheville dans le trou D[1]. La communication entre deux abonnés s'établit donc en reliant leurs commutateurs par un cordon à deux chevilles, la première cheville étant enfoncée dans le trou de droite d'un des commutateurs, la seconde dans le trou de gauche de l'autre.

Fig. 247.

La figure schématique 248 représente les commutateurs de deux abonnés réunis entre eux de la façon que nous venons de décrire. Comme on le voit, l'indicateur I se trouve placé en dérivation sur le circuit des deux abonnés.

Lorsque les commutateurs des deux abonnés à relier sont situés dans des tableaux voisins, on peut les joindre directement par un

[1] Dans la pratique, les plaques du commutateur ont toutes les deux un ressort ; mais celui de la plaque antérieure ne joue aucun rôle ; c'est pourquoi nous l'avons supprimé dans la description précédente.

cordon, comme il est montré sur la figure 245, entre le commutateur n° 4 du deuxième rang du tableau de gauche et le commutateur n° 4 du troisième rang du tableau de droite. S'ils sont éloignés, on les joint respectivement à des commutateurs auxiliaires désignés sur la figure sous le nom de *lignes d'abonnés*, qui n'ont qu'un seul trou et pas de ressort, et qu'on appelle simplement des

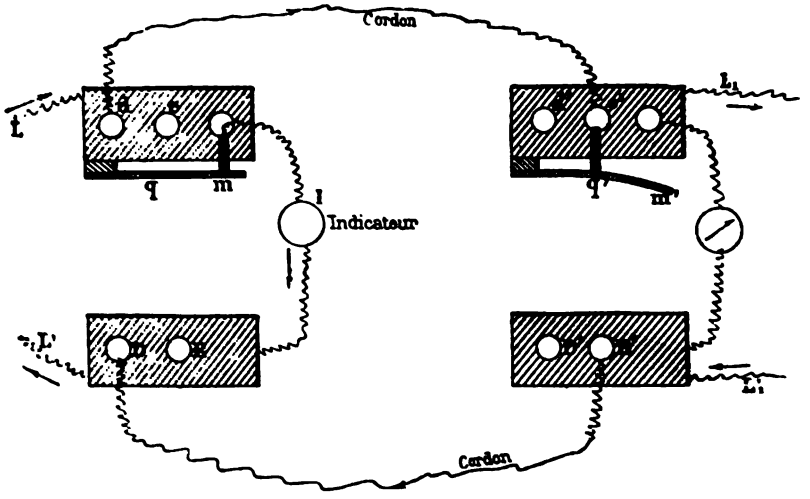
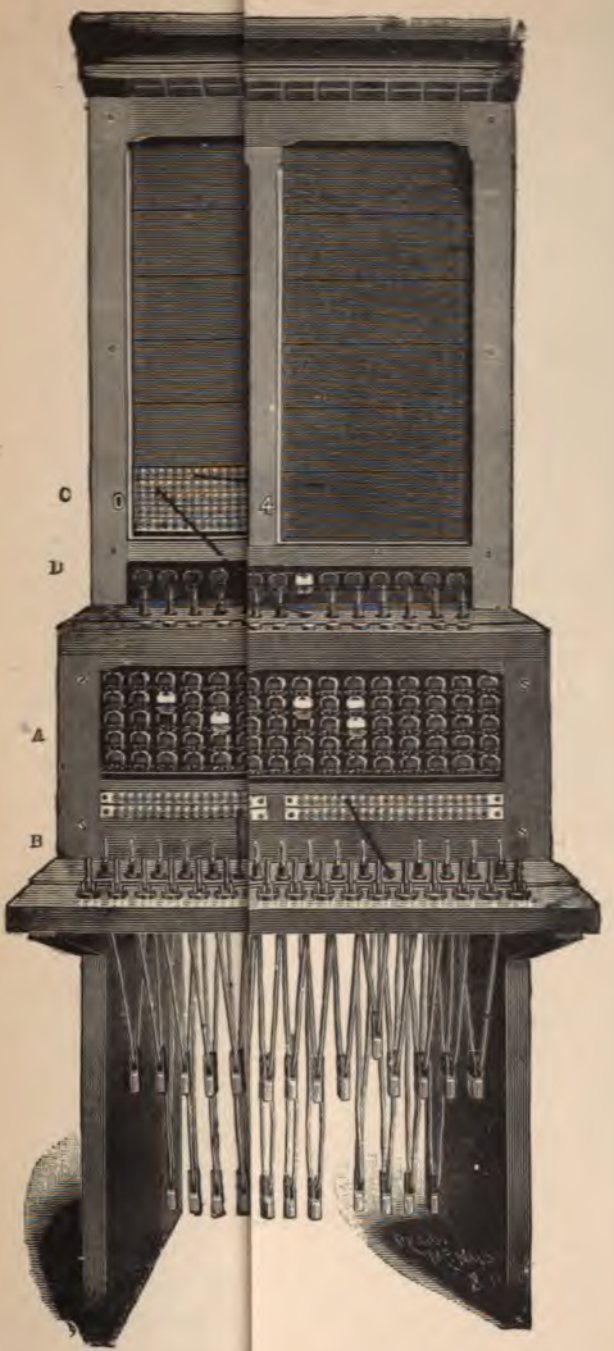


Fig. 248.

jacks. Les jacks sont numérotés suivant la place qu'ils occupent dans le panneau, et tous ceux de mêmes numéros communiquent entre eux par des fils placés derrière les cloisons; ils permettent ainsi de réunir deux commutateurs éloignés, sans qu'on soit obligé d'avoir recours à de trop longs cordons.

Enfin, si les deux abonnés n'appartiennent pas au même bureau, on les relie en employant les *lignes auxiliaires* qui joignent les différents bureaux. Les *lignes locales*, placées à la partie inférieure de la figure, font le même office, lorsque les commutateurs sont situés dans deux parties différentes du même bureau.

418. Bureau central avec tableaux multiples. — Le point faible des commutateurs à Jack-Knives consiste dans l'établissement des connexions entre deux tableaux éloignés l'un de l'autre, qui exige l'intervention de deux employés du même bureau et augmente le travail du personnel en ralentissant la rapidité des communica-


C
D
A
B

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX
TILDEN FOUNDATIONS

tions. Cette difficulté disparaît avec le système des *Tableaux multiples* imaginé en Amérique, que nous décrivons ci-dessous d'après le traité spécial de M. Wietlisbach, traduit par M. Marinovitch.

Ce système permet, en effet, à chaque employé de relier entre eux non seulement les fils qui font partie de son propre tableau, mais encore *tous les fils* qui aboutissent au bureau central, et cela sans être obligé de s'adresser à aucun des autres employés du bureau. Les lignes qui entrent dans le bureau sont partagées en groupes de deux cents, mais chacun des tableaux construits pour deux cents lignes est pourvu de contacts pour toutes les autres lignes du bureau ; tous les contacts qui dans les différents tableaux correspondent à une seule et même ligne sont reliés entre eux, et ceci permet à chaque employé d'effectuer sur son propre tableau, sans le secours de personne, toutes les communications demandées. Le tableau multiple dont la figure 249 donne une vue d'ensemble comprend une série d'annonciateurs, de connecteurs et de trous destinés à recevoir des chevilles.

Les trous des chevilles sont représentés par la figure 250 qui montre la position des pièces suivant que la cheville est enfoncée ou non. La barre métallique sur laquelle sont fixées les différentes

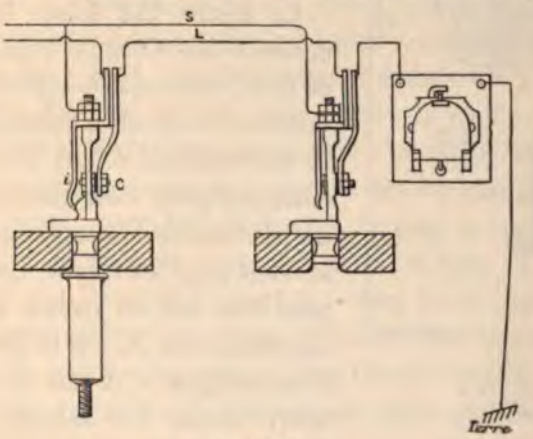


Fig. 250.

pièces est terminée d'un côté par une douille qui sert à recevoir la cheville, et de l'autre par deux écrous entre lesquels est serré le fil de ligne. Sur cette dernière barre, mais isolées par des cales en

ébonite, sont disposées deux pièces de contact reliées chacune à un conducteur. La première de ces pièces communique avec le ressort *i*, que nous appelons *ressort isolé* pour faciliter la description du jeu de l'appareil. L'autre pièce est reliée à un contact *c* sur lequel appuie en temps normal le ressort isolé. A chaque trou aboutissent donc trois conducteurs différents, reliés le premier au ressort isolé, le deuxième à la pointe de contact et le troisième à la masse de l'appareil. Nous verrons plus loin l'utilité de ces trois conducteurs, nous bornant à faire remarquer ici qu'en enfonçant une cheville dans la douille, on rompt le contact entre le ressort isolé et la pointe *c*, en même temps qu'on établit le contact entre cette même pointe et la masse de l'appareil à travers la cheville.

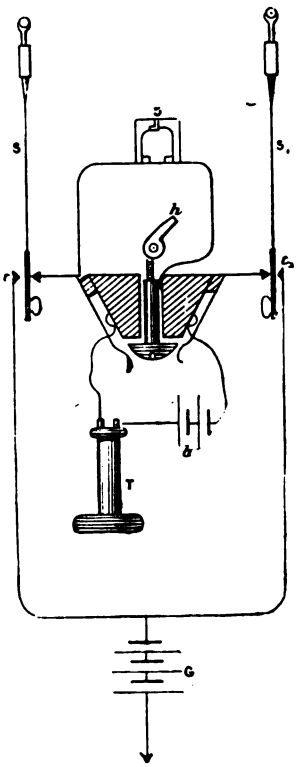


Fig. 251.

La construction des annonciateurs est analogue à celle que nous avons décrite à propos du commutateur précédent ; ils sont surtout caractérisés par une forme très ramassée. Un annonciateur n'occupe sur le tableau qu'un rectangle de 25 millimètres de hauteur et de 30 millimètres de largeur.

La figure 251 donne le schéma des connecteurs. Chacun d'eux se compose de deux cordons à chevilles *s*, s_1 entre lesquels est intercalé l'annonciateur de fin de conversation S. Les touches *t*, t_1, qui communiquent avec une batterie ou avec un générateur de courant quelconque G, servent pour les appels. Le téléphone T peut être mis en circuit à la place de l'annonciateur S, par le jeu d'un levier à excentrique *h*. A côté du téléphone se trouve encore une batterie *b*, dont nous indiquerons bientôt l'usage.

La disposition des tableaux varie un peu avec les différents constructeurs, mais le principe est toujours le même. La figure 249 montre une des dispositions les plus récentes. Dans la partie moyenne, sont

rangés les deux cents annonciateurs, qui sont distribués par groupes de cinquante et forment ainsi quatre panneaux. Au-dessous des annonciateurs sont placés les deux cents trous qui leur correspondent, que nous appellerons les *trous locaux*, pour les distinguer des autres trous du tableau. Sur la partie horizontale du tableau se trouvent les touches qui servent à sonner et à parler; la première rangée est formée par les leviers, dont le jeu met en circuit les téléphones du bureau. Le tableau qui a servi de modèle pour notre dessin possédait quarante connecteurs; on remarque un système de quarante touches, distribuées par groupes de dix, chaque groupe étant desservi par un employé spécial. Il résulte de là que dix connecteurs ont un appareil téléphonique commun; cet appareil n'est d'ailleurs pas représenté sur la figure. Derrière chaque touche se trouve une cheville, dont le cordon souple passe au-dessous de la table et est constamment tendu par un poids mobile. Le deuxième cordon souple est placé sur l'entablement qui surmonte la dernière rangée des annonciateurs. Au-dessus de cet entablement se trouve un tableau qui contient tout d'abord les quarante annonciateurs des connecteurs; au-dessus on voit des panneaux vides destinés à recevoir un nombre de trous de connexion égal à celui de toutes les lignes qui aboutissent dans le bureau; nous appellerons *trous de lignes* ces trous, afin de les distinguer des trous locaux, précédemment définis.

Sur la figure 249, on ne voit que quatre cents de ces trous, mais les dimensions du tableau permettent d'en placer trois mille; ces contacts s'ajoutent au fur et à mesure des besoins du service.

A chaque fil qui entre dans le bureau central correspond, sur chaque tableau, un trou de ligne; de plus, chaque fil a sur un tableau spécial son annonciateur et son trou local. Nous allons indiquer comment doivent être reliés ces différents appareils, puis nous suivrons la marche du courant dans les divers cas.

Toutes les fois que cela est possible, on place parallèlement, à côté les uns des autres, tous les tableaux d'un même bureau. On relie ensuite entre eux tous les trous de ligne qui portent le même numéro d'ordre, en ayant soin de faire en sorte que la pointe de contact de chaque appareil pris sur un tableau soit reliée avec le ressort isolé de l'appareil, pris sur le tableau suivant. Quand

ceci est fait, il ne reste plus de libres que les ressorts isolés du premier tableau et les pointes de contact du dernier tableau.

On relie aux ressorts isolés du premier tableau toutes les lignes qui entrent dans le bureau central et qui ont déjà passé par les parafoudres. Pour ce qui est des pointes de contact du dernier tableau, on les relie par des conducteurs, qui reviennent en arrière, aux tableaux sur lesquels se trouvent les annonciateurs et les trous locaux portant les numéros correspondants. C'est ainsi que les conducteurs numérotés de 1 à 200 relient les pointes de contact du dernier tableau avec les ressorts isolés des trous locaux du premier tableau; de là ces conducteurs passent aux pointes de contact des mêmes trous, aux annonciateurs et enfin à la terre. Les conducteurs de 201 à 400 vont du dernier tableau au deuxième, et ainsi de suite. Ces connexions une fois établies, tous les tableaux forment un appareil unique. Les fils de ligne sont tous amenés aux trous de ligne de tous les tableaux jusqu'au dernier, reviennent en arrière pour traverser les trous locaux correspondants, et se rendent enfin à la terre à travers leurs annonciateurs. La figure 252 donne le circuit complet pour un seul fil de ligne dont l'annonciateur est supposé placé sur le troisième tableau.

Lorsqu'un abonné quelconque, l'abonné n° 284 par exemple, appelle le bureau central, l'employé enfonce la cheville d'un de ses connecteurs dans le trou local n° 284 de la tablette inférieure, il fait jouer le levier qui commande le téléphone et prend l'ordre de l'abonné. Supposons que celui-ci demande la communication

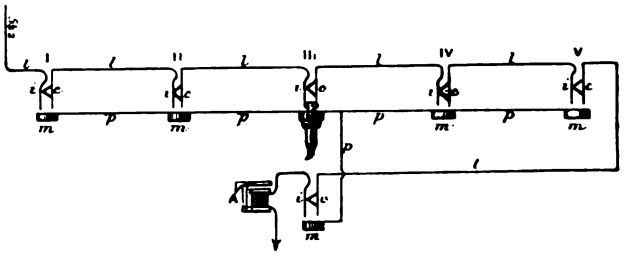


Fig. 252.

avec le n° 455, l'employé prend alors sur la plate-forme supérieure la deuxième cheville du même connecteur, l'enfonce dans le trou de ligne qui porte le n° 455 et appuie sur le bouton d'appel du cor-

don correspondant ; son rôle d'intermédiaire est alors terminé. Quand la conversation est finie, l'abonné qui a appelé le bureau central sonne de nouveau ; la plaque de l'annonciateur de fin de conversation tombe, et l'employé n'a qu'à retirer les deux chevilles qui, sous l'action des poids dont nous avons parlé, reviennent à leurs positions de repos.

Dans ce système, les employés n'ont pas besoin de communiquer entre eux et il faut, pour établir une communication, deux fois moins de temps qu'avec les commutateurs généralement usités. Inutile de dire que le nombre des employés se trouve réduit dans la même proportion.

Il nous reste encore à mentionner un détail particulier qui intéresse le fonctionnement de ces tableaux. Lorsqu'on place une cheville dans l'un quelconque des trous, le trou de ligne n° 245 par exemple qui appartient au deuxième tableau, on éloigne le ressort isolé de la vis de contact dans le trou considéré, et l'on coupe ainsi la ligne 245 pour tous les tableaux qui suivent. La ligne arrive, par le trou de ligne du premier tableau, au ressort isolé du second tableau, puis de là se rend, à travers la cheville, dans le connecteur. Mais comme cette opération a pour effet d'isoler la vis de contact sur le deuxième tableau, il en résulte que tous les trous de lignes des tableaux suivants, le trou local et l'annonciateur n° 245 sont coupés de la ligne. Or, il peut arriver qu'à ce moment un autre abonné, l'abonné n° 808 par exemple, qui appartient au cinquième tableau, demande le même numéro 245. Si l'employé placé au cinquième tableau se bornait à procéder de la façon précédemment décrite, il ne ferait qu'isoler la ligne n° 808. Voici en effet ce qui aurait lieu une fois les manipulations précédentes accomplies : la ligne n° 808 traverserait tous les trous locaux portant le n° 808 du bureau pour aboutir au trou local et au connecteur du cinquième tableau ; de là elle passerait à travers le trou de ligne n° 245 du même tableau, puis à travers les trous de ligne n° 245 des tableaux quatre et trois, et viendrait enfin se terminer au contact isolé du deuxième tableau. La ligne demeurerait coupée tant que l'une ou l'autre des deux communications ne serait pas rompue, et l'abonné 808 se trouverait pendant tout ce temps absolument en dehors du réseau. Un inconvénient tout à fait analogue

se présente si, un numéro étant déjà pris sur un tableau quelconque, l'employé placé à un tableau d'ordre inférieur donne la communication avec ce même numéro. Supposons en effet que la ligne n° 245 étant déjà prise au deuxième tableau, le n° 88 qui appartient au premier tableau demande cette même ligne, et qu'on établisse la communication entre les numéros 88 et 245 au premier tableau ; il est facile de voir que cette dernière communication se trouverait très bien établie et que les abonnés 88 et 245 pourraient causer ensemble, tandis que la communication précédemment existante serait rompue et le fil antérieurement relié avec le n° 245 coupé.

Il serait impossible de faire un service régulier dans ces conditions; aussi est-on obligé de recourir à un troisième système de conducteurs, que nous désignerons sous le nom de *fils d'épreuve* et qui sont destinés à remédier aux inconvénients précités. Les fils d'épreuve relient électriquement entre elles les masses de tous les commutateurs portant le même numéro d'ordre. Dès que dans un trou quelconque on place une cheville, on fait communiquer la masse du commutateur considéré avec le ressort isolé et la ligne, et comme les masses de tous les appareils communiquent entre elles, elles se trouvent toutes du même coup reliées à la ligne. La figure 252 montre le schéma de tous les circuits pour le fil n° 542. Ce schéma est fait dans l'hypothèse où il y aurait cinq tableaux au bureau central ; *i* représente le ressort isolé, *c* la vis de contact, et *m* la masse des différents commutateurs; *A* représente les annonciateurs, *l* les fils de ligne et *p* les fils d'épreuve ; le trou de ligne du troisième tableau étant occupé par une cheville, les trous de ligne des tableaux quatre et cinq et le trou local du tableau trois se trouvent isolés ; la même cheville établit par contre la communication entre la ligne et tous les fils *p*.

Nous avons fait remarquer précédemment (voir fig. 251), que les appareils téléphoniques des employés étaient pourvus d'une batterie *b*. Si, en un point quelconque, on établit la communication entre une cheville et la masse *m* d'un commutateur, le courant de la pile traversant le téléphone, le cordon souple et le fil *p*, se rend au ressort isolé du trou déjà occupé et de là dans la ligne correspondante. Le passage de ce courant produit dans le téléphone

un bruit caractéristique, qui avertit l'employé que la ligne est déjà prise. Si au contraire la ligne considérée est libre, il ne passe aucun courant dans le téléphone, puisque les fils *p* sont partout isolés. Un bruit analogue se produit dans les téléphones des deux abonnés dont la ligne est soumise à cette épreuve, mais ce bruit est très faible et à peine sensible.

Le point le plus délicat dans les tableaux multiples est le montage qui nécessite un très grand nombre de fils. Il faut en effet entre deux tableaux prévoir :

1° Un fil de ligne pour chaque numéro ;

2° Un fil d'épreuve pour chaque numéro ;

3° Un fil local pour chaque annonciateur.

Dans un bureau central de trois mille abonnés avec quinze tableaux, on devra faire aboutir à chaque tableau trois mille fils de ligne et trois mille fils d'épreuve. On aura de plus, entre le dernier et l'avant dernier tableau, deux mille huit cents fils locaux; entre les tableaux quatorze et treize, deux mille six cents fils locaux, et ainsi de suite ; le nombre moyen des fils entre deux tableaux peut être évalué à sept mille cinq cents environ. Il faut une étude toute spéciale pour arriver à loger et à fixer solidement cette quantité énorme de fils. Comme les trous des chevilles sont groupés par rangées de vingt, on emploie en général des câbles sans induction, à vingt âmes.

Il faut néanmoins une moyenne de trois cent soixante-quinze câbles entre deux tableaux consécutifs, il en faut même quatre cent quarante entre les tableaux quatorze et quinze. Ces câbles représentent une longueur de dix kilomètres au minimum ; le développement du fil nécessaire pour monter quinze tableaux est donc de plus de deux cents kilomètres. Le nombre des connexions à établir est naturellement en rapport avec la longueur du fil. A chaque trou de cheville abontissent trois conducteurs. Un tableau ayant trois mille deux cents trous, cela fait neuf mille six cents contacts à établir par tableau, et cent quarante mille pour l'ensemble des quinze tableaux. Il va de soi que ces contacts doivent être soudés avec le plus grand soin, d'autant plus qu'avec cette quantité prodigieuse de fils et de points de soudure, les réparations ne peuvent se faire qu'avec une difficulté extrême.

Actuellement il existe plusieurs centaines de tableaux multiples, employés dans le service téléphonique du nouveau et de l'ancien continent; la plupart de ces tableaux ont été construits par la Western Electric C° de Chicago. Les villes d'Europe qui en possèdent sont, entre autres : Christiania, Stockholm, Liverpool, Genève, Anvers et Bruxelles.

419. Installations téléphoniques privées. — Nous avons vu comment on organise un service téléphonique public. Le téléphone peut être installé également pour un service privé; dans bien des cas, il est susceptible de rendre de très grands services et l'installation est quelquefois fort simple. On est même en droit de se demander pourquoi l'usage ne s'en est pas répandu davantage dans une foule de cas. Citons, par exemple, de grandes usines métallurgiques composées d'ateliers distincts dépendant d'un bureau de direction. Il en est de même dans des chantiers de construction, comme des arsenaux, où les divers services sont installés toujours à de grandes distances de la direction et parfois séparés par des bras de mer. La transmission des ordres se fait par des hommes et exige beaucoup de temps. Une installation téléphonique serait très facile et réaliserait une grande économie de temps et d'argent. Il existe beaucoup de cas semblables ; ces deux exemples suffisent pour montrer le parti que l'on peut tirer du téléphone.

Les installations privées se divisent en trois catégories :

1° Installation comportant seulement deux postes ;

2° Installation avec poste central desservant chacun des postes secondaires qui ne peuvent communiquer que par son intermédiaire;

3° Installation avec postes embrochés reliés par un seul fil et pouvant communiquer à volonté et directement les uns avec les autres.

1° *Installation avec deux postes.* — Ce cas est très simple. Il suffit en effet, en se reportant à la figure 242, de réunir les deux postes entre eux par le fil extérieur L, le fil T communiquant à la terre dans chaque poste, ou bien un second fil T réunissant les deux postes.

2° *Installation avec poste central.* — La disposition est absolu-

ment identique à celle que nous avons décrite pour un service public. L'un des postes sert de centre, les autres sont postes simples.

Les postes simples demandent toujours la communication au poste central. Celui-ci est muni des appareils nécessaires pour répondre à celui qui appelle et le mettre en communication avec celui des autres postes simples que le premier a demandé.

L'intervention du poste central est donc nécessaire pour toutes les communications. Tous les autres sont par suite reliés avec le poste central d'où rayonne une série de lignes à un fil ou à deux fils, suivant que l'on fait usage ou non de la terre.

Chaque poste simple comporte : 1 transmetteur microphonique, 2 récepteurs téléphoniques, 1 parafoudre, 1 sonnerie, 1 pile.

Le poste central est formé de : 1 transmetteur microphonique, 2 récepteurs téléphoniques, 1 sonnerie, 1 pile, 1 tableau annonciateur avec Jack-Knives.

L'appel d'un poste quelconque au poste central actionne la sonnerie de ce poste et déclanche le numéro correspondant au poste qui appelle ; le poste central relie celui-ci avec le poste appelé au moyen d'un cordon à double fiche.

3° *Installations avec postes embrochés.* — Les installations avec poste central pour un nombre peu important de postes présentent l'inconvénient d'immobiliser une personne auprès du tableau annonciateur. Ce système n'est avantageux que dans le cas d'un bureau de direction, où se trouvent toujours de nombreux employés dont l'un peut faire momentanément le service.

D'autre part, lorsque, comme sur une ligne de chemins de fer par exemple, les postes à réunir sont à la suite les uns des autres, les conducteurs partant du poste central forment un réseau de fils qui devient rapidement très dense, coûteux d'installation et encombrant.

Le système par postes *embrochés* a pour but de permettre l'appel direct d'un poste quelconque à un autre poste également quelconque, en n'exigeant qu'un seul fil, si la terre sert de retour, et deux fils seulement dans le cas contraire ; ces résultats étant obtenus quel que soit le nombre des postes à relier.

La maison Breguet a résolu ce problème d'une manière simple et pratique qu'il nous paraît intéressant de faire connaître. La base de son système de postes embrochés est la suivante :

Tous les postes sont semblables.

Chacun d'eux comprend les appareils d'un poste simple de la catégorie précédente, et, en plus, un indicateur à cadran, un bouton d'appel spécial à tirage.

Les postes, quel qu'en soit le nombre, sont successivement réunis l'un à la suite de l'autre depuis le premier jusqu'au dernier par un seul fil.

Si la terre sert de retour, le premier et le dernier poste sont reliés à la terre par l'intermédiaire d'une plaque de terre ou d'une canalisation d'eau ou de gaz. Si le retour doit avoir lieu par fil spécial, le premier et le dernier poste sont reliés directement par un second fil parallèle au premier.

Soit 13 postes à mettre en communication téléphonique. L'indicateur à cadran de chacun des postes comprend 15 cases numérotées de 1 à 13 ; la quatorzième case est marquée « occupée » et la quinzième est marquée « libre ».

Lorsque l'aiguille de l'indicateur du poste 1 est sur la case 1, elle ferme la sonnerie de ce poste sur la pile locale. Lorsque l'aiguille de l'indicateur du poste 2 est sur la case 2, elle ferme la sonnerie de ce poste sur la pile locale, etc.

Cela posé, supposons que le poste 10 veuille appeler le poste 3.

L'opérateur en 10 se porte à l'appareil et tire trois fois sur le bouton d'appel ; la première fois, toutes les aiguilles se portent sur la case 1, et au poste 1 sonne un coup; la deuxième fois, toutes les aiguilles se portent sur la case 2, et au poste 2 sonne un coup; la troisième fois, toutes les aiguilles se portent sur la case 3, et au poste 3 la sonnerie tinte aussi longtemps qu'aucune modification ne sera apportée à l'ensemble.

Le poste 3 étant prévenu, la personne appelée va à l'appareil et tire sur son bouton d'appel assez de fois pour amener les aiguilles des indicateurs sur la case « occupée » (dans le cas présent 11 fois); puis la conversation s'engage entre les postes 3 et 10.

Dès que la conversation est terminée, le poste qui a appelé (ici le poste 10) tire une fois sur son bouton d'appel; toutes les aiguilles

se portent sur la case « *libre* », et la case est rendue « *libre* » pour tous les postes.

L'avantage le plus important de ce système est la suppression d'un nombre considérable de fils à faire partir d'un même poste, et par suite la suppression des potelets, poteaux, pylones, qui accompagnent forcément les installations téléphoniques importantes de la deuxième catégorie.

420. Lignes aériennes. — Comme nous l'avons dit plus haut, Paris est la seule ville qui possède un réseau téléphonique souterrain, la canalisation des égouts ayant fourni une voie toute prête pour les conducteurs électriques. Dans les autres villes, le problème est plus difficile, et il faut établir sous les trottoirs des conduites spéciales dont le prix est fort élevé. Aussi les installations de ce genre sont-elles encore peu nombreuses, mais la question est fort étudiée aux États-Unis, où certaines municipalités ont même imposé l'emploi de lignes souterraines.

Les fils aériens offrent en effet des inconvénients sérieux : leur pose, leur entretien, leurs réparations nécessitent le consentement des propriétaires des maisons sur lesquelles ils sont placés ; c'est une source de contestations et de procès. En outre, les fils aériens ont à résister aux intempéries atmosphériques, et bien souvent déjà les ouragans, la neige ou le verglas leur ont causé de sérieux dommages.

Les lignes téléphoniques aériennes étaient autrefois construites en fil d'acier galvanisé de 2 millimètres de diamètre ; ce fil pèse environ 25 kilogrammes par kilomètre et possède une résistance à la rupture de 350 kilogrammes, soit 120 kilogrammes par millimètre carré ; sa résistance électrique est de 39 ohms par kilomètre.

Depuis quelques années, on a supprimé l'acier sur les lignes aériennes et on lui a substitué le cuivre dur, le bronze phosphoreux ou le bronze silicieux. Le fil d'acier de 2 millimètres de diamètre pesant 25 kilogrammes par kilomètre, dont nous avons parlé plus haut, peut en effet être remplacé par du fil de bronze silicieux de 1,1 millimètre, pesant seulement $8^{kg},45$ par kilomètre. La ligne se trouve ainsi trois fois plus légère, ce qui facilite singuliè-

rement la pose, charge moins les poteaux et permet de diminuer leur nombre et leurs dimensions; on réalise de cette manière une économie assez importante sur les supports, ainsi que l'a montré l'installation du réseau téléphonique de Reims.

En outre, lorsqu'il s'agit de lignes assez longues, dans le cas des lignes interurbaines par exemple, les communications ne peuvent être bonnes que si la ligne présente une résistance électrique assez faible. Le fer et l'acier sont d'un emploi impossible dès que la distance atteint 100 kilomètres; il faut alors recourir au cuivre ou au bronze; c'est ce qui a été fait sur les lignes récemment construites entre Paris et Bruxelles et entre Paris et Marseille.

421. Phénomènes d'induction. — Comme tous les circuits électriques, ceux des téléphones peuvent être complétés par la terre, c'est-à-dire que, si l'on a deux postes à relier, il suffit de les réunir par un seul fil métallique, à la condition de mettre les deux appareils à la terre.

Mais, en agissant ainsi, on s'expose à un inconvénient fort grave, lorsque le fil se trouve dans le voisinage d'autres lignes électriques; dans ce cas, en effet, les variations d'intensité des courants qui circulent sur ces lignes développent dans le fil unique des courants induits qui s'ajoutent aux courants téléphoniques et ôtent toute clarté aux communications. Les conversations se mélangent, et il arrive souvent que l'on entend sur une ligne des paroles prononcées sur les autres.

Le mal est encore plus grand lorsque le fil est placé près de lignes télégraphiques, où les interruptions du courant sont continuelles, et où les variations de l'intensité sont, par suite, beaucoup plus grandes que sur les lignes téléphoniques. Les bruits dus à l'induction, communément désignés sous le nom de *bruits de friture*, sont alors très intenses et empêchent toute conversation.

Le moyen de remédier à ce défaut consiste à ne pas employer la terre et à prendre un double fil pour la ligne : les courants induits dans chacun des deux fils sont égaux et de même sens et se détruisent réciproquement. Seulement l'installation devient plus coûteuse, puisqu'il faut une longueur double de conducteur.

Cette disposition ne donne naturellement de bons résultats que lorsque la distance des deux fils aux autres lignes est sensiblement la même, résultat que l'on peut obtenir sur les lignes aériennes, mais seulement au moyen de dispositions particulières que nous allons indiquer. Quant aux câbles souterrains, au contraire, il est bien plus difficile d'y détruire complètement les bruits d'induction.

422. — Sur une ligne de poteaux portant un seul fil télégraphique il suffit de placer les deux fils téléphoniques parallèlement au premier et à égale distance de lui.

Mais dans le cas ordinaire, c'est-à-dire quand les poteaux portent plusieurs conducteurs télégraphiques dont le nombre varie tout le long du parcours, il est difficile d'équilibrer les courants induits, à cause de la différence des distances relatives et de la diversité des courants primaires ; il faut alors faire tourner les deux fils conjugués l'un autour de l'autre en hélices allongées. Soient P, P' les lignes télégraphiques, A, B les deux fils du circuit téléphonique (fig. 253). Quand un courant circule en P, par exemple, si les sections *ab*, *de* sont toutes de même longueur, et si, en outre,

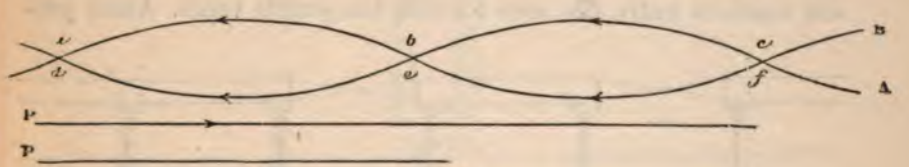


Fig. 253.

les sections *ab*, *bc* d'une part, et *de*, *ef* d'autre part, conservent toujours leurs distances relatives à P, la résultante des actions inductrices est la même dans chaque fil téléphonique, et les deux courants induits se noutralisent.

La figure 254 montre, par exemple, la disposition adoptée pour établir un circuit téléphonique à double fil sur des poteaux télégraphiques munis de traverses.

Quand les poteaux ne portent pas de traverses, on peut employer le système adopté sur la ligne d'Anvers à Bruxelles (fig. 255). Pour éviter des croisements entre deux nappes de fils téléphoniques

régnant sur les faces des supports, on a disposé les fils téléphoniques au sommet des poteaux, en employant une ferrure spéciale formée de deux branches d'inégale hauteur. Les branches sont orientées en sens opposé d'un poteau à l'autre. Dans une portée, les deux fils, sans changer d'altitude, se croisent en projection horizontale ; dans la portée suivante ils se croisent en projection

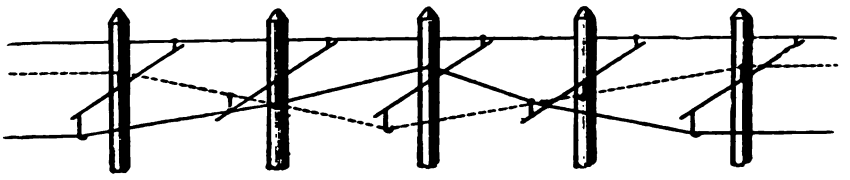


Fig. 254.

verticale. Ainsi entre cinq poteaux, c'est-à-dire sur une longueur de 250 à 300 mètres, chaque fil fait un tour complet ; et chacun d'eux offre à l'induction des circuits télégraphiques une somme égale de positions relatives semblables.

423. — On peut craindre que ce système de croisement n'amène des contacts entre fils sous l'action des grands vents. Aussi pré-

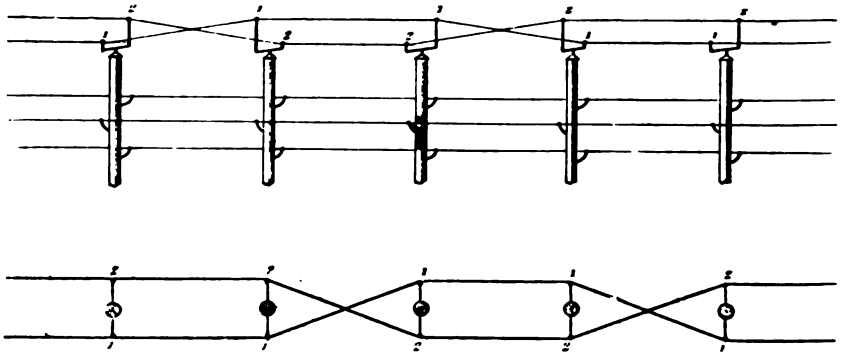


Fig. 255.

fère-t-on faire aux *poteaux mêmes* les croisements complets tant en hauteur qu'en largeur. Dans ce but, on emploie une ferrure à quatre branches de hauteurs inégales (fig. 256). Si cinq poteaux en

sont munis, chaque fil, après avoir parcouru cet espace, a accompli un tour complet d'hélice. Les points de croisement complet sont situés, par exemple, tous les kilomètres, et les poteaux intermédiaires sont munis simplement de ferrures à deux branches, comme celle décrite plus haut. Ce système a été établi sur la ligne de Paris à Bruxelles. L'inconvénient est d'augmenter le nombre d'isolateurs et, par suite, les chances de dérivation à la terre, puisqu'à chaque poteau de croisement il faut deux supports.

En résumé, il est impossible de déterminer à priori laquelle de ces deux solutions est la plus avantageuse ; tout dépend des circons-

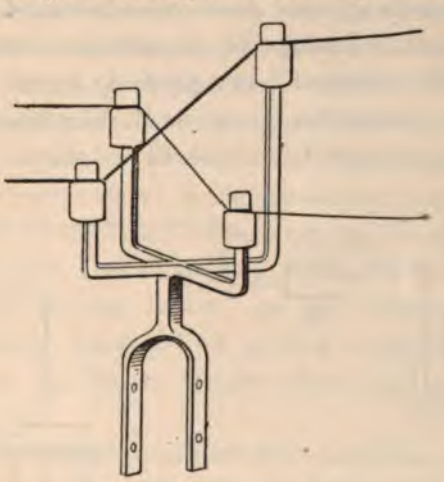


Fig. 256.

tances. Quand on a à établir une ligne dans un climat sec et qu'elle peut être exposée à des vents violents et répétés, il est préférable de conserver les fils parallèles en pleine portée et de faire les croisements sur les poteaux. Au contraire, s'il s'agit d'une région humide où chaque point d'appui constitue une perte, on a intérêt à croiser les fils dans l'intervalle des supports.

424. Système Van Rysselberghe. — M. Van Rysselberghe a proposé, il y a quelques années, un procédé très ingénieux pour supprimer les effets d'induction dans les lignes téléphoniques disposées parallèlement aux lignes télégraphiques et sur les mêmes sup-

ports. Au début de ses expériences, il évitait la production ou la suppression brusque du courant télégraphique en le graduant convenablement au moyen de résistances intercalées successivement dans le circuit au moment de la fermeture, et retirées successivement au moment de l'ouverture ; cette variation de résistance du circuit s'obtenait d'une façon automatique par le jeu même du manipulateur.

Ce système avait l'inconvénient d'exiger des appareils spéciaux pour la télégraphie. M. Van Rysselberghe a trouvé un autre moyen plus simple et plus efficace qui consiste à placer dans le circuit des condensateurs et des électro-aimants.

Ces appareils agissent dans ce cas comme des réservoirs, absorbant pendant le passage du courant une certaine quantité d'électricité qu'ils restituent à la rupture du circuit.

En effet, suivant les termes de M. Van Rysselberghe, « un électro-aimant est une bobine de fil métallique avec noyau de fer

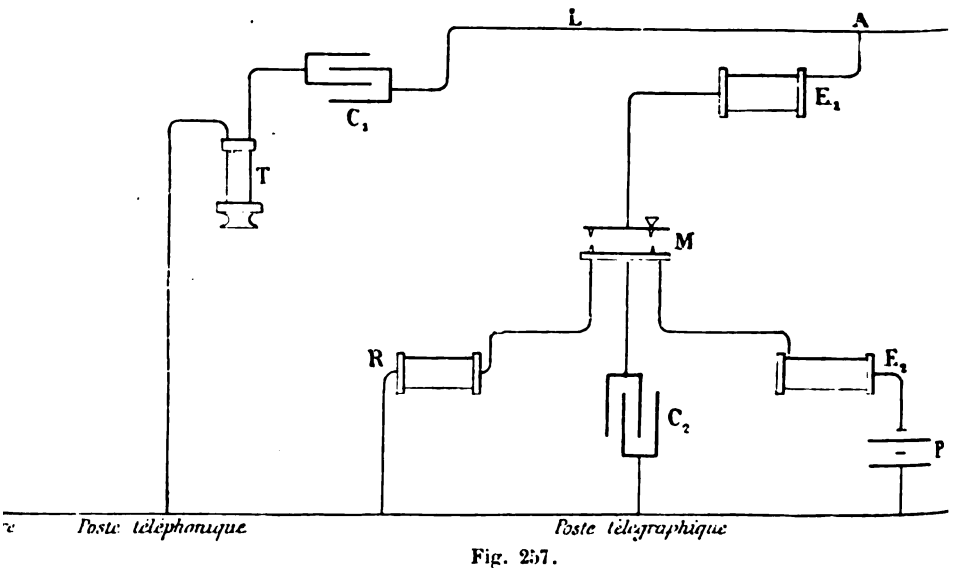


Fig. 257.

doux. Lorsqu'un courant commence à circuler dans une bobine ainsi construite, le noyau en fer s'aimante graduellement, d'où absorption graduelle d'une certaine quantité d'énergie électrique. Au contraire, lorsque le courant cesse dans cette bobine, le noyau

se désaimante graduellement, d'où restitution graduelle de l'énergie absorbée dans la première phase.

« Un condensateur est formé par la superposition alternative de feuilles de papier d'étain, réunies de façon que l'ensemble constitue deux grandes surfaces métalliques séparées simplement par une couche de matière isolante. L'une de ces surfaces étant mise en communication avec une ligne télégraphique, l'autre étant reliée à la terre, à chaque émission d'électricité sur le fil, le condensateur en absorbe graduellement une certaine quantité, qu'il restitue graduellement lorsque l'émission cesse.

« En d'autres termes, ces électro-aimants et ces condensateurs sont à l'égard des courants électriques ce que sont les réservoirs à air dans les pompes à incendie ; ce sont des poches qui se remplissent et qui se vident graduellement, enlevant ainsi toute brusquerie dans les changements de pression électrique. »

Appliquée sur les lignes voisines des fils téléphoniques, cette combinaison d'électro-aimants et de condensateurs pouvait donc supprimer les effets d'induction ; mais, pour que le résultat fût satisfaisant, il fallait que l'on modifiât l'installation de tous les postes télégraphiques de ces lignes, ce qui entraînait à des dépenses considérables. Aussi a-t-on préféré renoncer à cette solution et employer les lignes croisées dont nous venons de parler.

Le système Van Rysselberghe est toutefois susceptible de rendre des services si on se contente de l'installer sur la ligne téléphonique elle-même, car il permet alors de télégraphier et de téléphoner simultanément sur cette ligne. Voici la disposition à laquelle l'inventeur a été conduit par l'expérience. L est la ligne (fig. 257) qui, arrivée en A, se divise sur le poste téléphonique et sur le poste télégraphique. C_1 est un condensateur de deux microfarads placé sur la ligne téléphonique entre le point A et le téléphone T. A partir du point A, la ligne télégraphique traverse un électro-aimant E_1 droit de 500 ohms de résistance, et arrive au manipulateur Morse ordinaire M ; R est le récepteur télégraphique ; C_2 est un second condensateur de deux microfarads placé en dérivation, et E_2 un second électro-aimant de 500 ohms intercalé entre le manipulateur et la pile P.

Ce n'est qu'à la suite de nombreux essais que M. Van Ryssel-

berghe s'est arrêté à cette combinaison de condensateurs et d'électro-aimants, qui servent à régler la fermeture et l'ouverture du circuit télégraphique. Compris de cette manière, ce système peut être avantageux; il a d'ailleurs reçu un assez grand nombre d'applications, sur quelques lignes téléphoniques interurbaines, et notamment sur celles de Paris à Bruxelles et de Paris à Reims.

APPENDICE

NOTE I

RÉSISTANCE DES MÉTAUX

RÉSISTANCE DES MÉTAUX ET ALLIAGES USUELS A 0° CENTIGRADE

NOMS	RÉSISTANCE A 0° d'un centimètre cube entre ses faces opposées (résistance spécifique).	RÉSISTANCE A 0° d'un fil d'un mètre de long et d'un millimètre de diamètre.	QUANTITÉ pour 100 d'augmentation de résistance par degré centigrade.
	microhms.	ohm.	
Argent recuit	1,521	0,01937	0,377
Argent écroui	1,652	0,02103	»
Cuivre recuit.	1,616	0,02057	0,388
Cuivre écroui	1,652	0,02104	»
Or recuit	2,081	0,02650	0,365
Or écroui	2,118	0,02697	»
Aluminium recuit . . .	2,945	0,03751	»
Zinc comprimé.	5,689	0,07244	0,365
Platine recuit	9,158	0,1166	»
Fer recuit.	9,825	0,1251	0,630
Nickel recuit.	12,60	0,1604	»
Etain comprimé	13,36	0,1701	0,365
Plomb comprimé. . . .	19,85	0,2526	0,387
Antimoine comprimé. .	35,90	0,4571	0,389
Bismuth comprimé. . .	132,70	1,6890	0,354
Mercure liquide	99,74	1,2247	0,072
2 parties argent, 1 platine	24,66	0,3140	0,031
Maillechort	21,17	0,2695	0,044
2 parties or, 1 argent .	10,99	0,1399	0,065

RÉSISTANCE DES FILS ET DES BARRES DE CUIVRE PUR RECUIT A 0° CENTIGRADE

DIAMÈTRE en MILLIMÈTRES	POIDS PAR MÈTRE en GRAMMES (fil nu).	LONGUEUR EN MÈTRES PAR KILOGRAMME (fil nu).	RÉSISTANCE PAR MÈTRE en ohms.
0,1	0,0699	14369	2,036
0,2	0,2797	3614	0,514
0,3	0,7181	1607	0,2285
0,4	1,175	902	0,1224
0,5	1,74	576	0,081
0,6	2,52	400	0,057
0,7	2,83	294	0,042
0,8	4,47	225	0,032
0,9	5,66	178	0,025
1	6,99	144	0,020
1,1	8,47	119	0,017
1,2	10,06	100	0,014
1,3	11,84	85	0,012
1,4	13,70	73	0,0105
1,5	15.75	63	0,0091
1,6	17,89	56	0,0080
1,8	22,70	44	0,0063
2	27,95	36	0,0051
2,5	43,70	23	0,0032
3	62,93	16	0,0023
3,5	85,67	11,7	0,00165
4	111.90	8,94	0,00129
4,5	141,80	7,05	0,001011
5	174,00	5,70	0,000800
6	251,70	4,00	0,000580
7	342,70	2,92	0,000412
8	447,30	2,23	0,000321
9	567,00	1,76	0,000253
10	699,00	1,44	0,000200

Le premier tableau nous permet de calculer la résistance électrique d'une tige métallique. Supposons, par exemple, qu'on veuille connaître la résistance d'une tige de cuivre écroui ayant 25 millimètres sur 12 millimètres de section, et 500 mètres de longueur. Nous savons que la résistance est proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section. Nous pouvons donc poser :

$$R = \frac{1,652 \times 50\,000}{2,5 \times 1,2} = 27\,530 \text{ microhms}$$
$$= 0,027\,530 \text{ ohm.}$$

S'il s'agit d'une tige cylindrique, la deuxième colonne nous donne la résistance très facilement; nous voyons que la résistance d'un fil de 1 mètre de long et de 1 millimètre de diamètre est 0,02104 ohm; donc pour un diamètre de d millimètres et une longueur de l mètres, la résistance sera $\frac{0,02104}{d^2} \times l$ ohms.

Le second tableau indique les résistances des fils et barres de cuivre de différents diamètres avec les poids correspondants (le poids spécifique du cuivre est supposé égal à 8,878).

NOTE II

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Système d'unités absolues CGS. — Les unités électriques employées aujourd'hui d'une façon générale font partie d'un système dit d'*unités absolues.*

Voici sur quelles bases il est fondé. L'étude des phénomènes physiques peut toujours se ramener à celle de trois éléments : la longueur, la masse, le temps. On est convenu d'adopter pour chacun de ces éléments une unité parfaitement définie et établie d'une façon invariable. Les trois unités *fondamentales* ont été arrêtées comme il suit :

L'unité de longueur L est le *centimètre.*

L'unité de temps T est la *seconde.*

Enfin l'unité de masse M est la masse d'un *gramme;* c'est la masse de 1 centimètre cube d'eau distillée à la température de 4°. On a adopté la masse au lieu du poids parce que ce dernier varie avec la latitude et l'altitude, de sorte que le centimètre cube d'eau ne pèse pas le même poids en tous les points du globe; sa masse au contraire ne varie pas.

Le système d'unités qui a été déduit de ces unités fondamentales a reçu le nom de système *centimètre-gramme-seconde,* ou d'une façon abrégée CGS.

Ces trois unités forment la base du système et, pour évaluer les autres grandeurs, on se sert d'unités *dérivées* se rattachant aux premières. La formule qui exprime chacune d'elles en fonction des unités fondamentales se nomme *dimension* de l'unité dérivée.

Unités dérivées géométriques et mécaniques. — Nous allons indiquer les dimensions de ces différentes unités.

Surface. — L'unité CGS de surface est le centimètre carré ; sa dimension est L^2.

Volume. — L'unité CGS de volume est le centimètre cube ; sa dimension est L^3.

Vitesse. — L'unité CGS de vitesse est la vitesse d'un mobile parcourant d'un mouvement uniforme 1 centimètre par seconde. Sa dimension est $\frac{L}{T}$ ou LT^{-1}.

Accélération. — L'unité CGS d'accélération est donnée par l'accélération d'un mouvement uniformément varié dont la vitesse augmente de 1 centimètre par seconde. Sa dimension est $\frac{L}{T^2}$ ou LT^{-2} ; on la tire de la formule $v = g\ T$, où v représente la vitesse et g l'accélération, en remplaçant v par la dimension trouvée précédemment.

Force. — L'unité de force CGS se nomme la *dyne*. C'est la force capable de communiquer dans une seconde à l'unité de masse une accélération égale à l'unité. Sa dimension est $\frac{ML}{T^2}$ ou MLT^{-2} : on la tire de la formule $f = Mg$, dans laquelle on remplace l'accélération g par sa dimension.

Travail. — L'unité CGS de travail se nomme l'*erg*. C'est le travail produit par une dyne agissant sur un point qui parcourt dans sa direction une longueur égale à 1 centimètre. Sa dimension est $\frac{ML^2}{T^2}$ ou ML^2T^{-2} ; c'est le produit de la dyne MLT^{-2} par la longueur L.

Unités électriques CGS. — Il faut voir maintenant comment la mesure des grandeurs électriques a pu être rattachée au système CGS défini ci-dessus.

Soient i l'intensité d'un courant produit par une force électromotrice e à travers un circuit de résistance r, q la quantité d'électricité qui passe dans le temps t, w le travail effectué et c la capacité du circuit. Nous avons les relations :

$$i = \frac{e}{r}$$
$$q = it$$
$$w = qe$$
$$c = \frac{q}{e}$$

Il est évident qu'il suffit de rattacher l'une des cinq grandeurs q, i, r, e, c, au système CGS pour que les quatre autres se trouvent définies par ces formules.

Pour cette grandeur, dont le choix est arbitraire, on peut prendre soit la quantité d'électricité, que l'on définit en s'appuyant sur les phénomènes d'attraction et de répulsion électriques, soit l'intensité, que l'on définit par l'action d'un courant sur un pôle magnétique. Il résulte de là deux systèmes d'unités électriques : le premier qui se nomme *électro-statique*, et le deuxième, *électro-magnétique*

Système électro-magnétique. — C'est ce système qui a été adopté par le Congrès des électriciens en 1881. En voici l'exposé :

Unité de pôle magnétique. — L'unité CGS d'intensité de pôle magnétique est celle du pôle qui, agissant à la distance de 1 centimètre sur un pôle identique, exerce une force de répulsion de 1 dyne.

Soient m, m' deux masses magnétiques, f la force qui s'exerce entre elles et d leur distance, on a :

$$f = \frac{m\,m'}{d^2}.$$

Si dans cette formule nous faisons $m = m'$, et si nous remplaçons f par la dimension de l'unité de force MLT^{-2} et d par L, nous avons l'équation :

$$ML^3T^{-2} = m^2;$$

ce qui nous donne la dimension de l'unité de pôle :

$$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-1}.$$

Unité d'intensité. — L'unité de pôle étant définie, nous prendrons pour unité CGS d'intensité de courant celle du courant qui, traversant un circuit long de 1 centimètre et courbé en arc de cercle de 1 centimètre de rayon, exerce une force de 1 dyne sur un pôle magnétique ayant une intensité égale à l'unité et placé au centre du circuit.

Soit f la force exercée par un courant circulaire d'intensité i et de longueur s sur un pôle magnétique d'intensité m placé au centre du cercle, d étant le rayon de ce cercle. On a la relation :

$$f = \frac{mis}{d^2};$$

d'où

$$i = \frac{fd^2}{ms}.$$

Si, dans cette formule, nous remplaçons les lettres par les dimensions des unités correspondantes, nous avons :

$$i = \frac{\mathrm{M\,L\,T^{-2}} \times \mathrm{L^2}}{\mathrm{M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{3}{2}}\,T^{-1}} \times \mathrm{L}};$$

Ce qui nous donne pour dimension de l'unité d'intensité de courant :

$$\mathrm{M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{1}{2}}\,T^{-1}}.$$

Unité de quantité. — L'unité CGS de quantité est celle qui est fournie pendant 1 seconde par un courant dont l'intensité est égale à l'unité. En remplaçant dans la formule $q = it$, i et t par leurs dimensions, on obtient la dimension de l'unité de quantité :

$$\mathrm{M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{1}{2}}}.$$

Unité de force électromotrice. — L'unité CGS de force électromotrice est celle qui existe dans un circuit quand le passage de l'unité de quantité développe un travail égal à 1 erg. On la calcule au moyen de la formule $w = q\,e$, et sa dimension est :

$$\mathrm{M^{\frac{1}{2}}\,L^{\frac{3}{2}}\,T^{-2}}.$$

Unité de résistance. — La formule $i = \frac{e}{r}$ nous permet de déterminer l'unité CGS de résistance. C'est celle d'un circuit qui est traversé par un courant d'intensité égale à l'unité avec l'unité de force électromotrice. Sa dimension est :

$$\mathrm{L\,T^{-1}}.$$

Unité de capacité. — La capacité d'un condensateur est égale à 1 unité CGS, quand il renferme une quantité d'électricité égale à l'unité avec une force électromotrice égale à l'unité. La formule $c = \frac{q}{e}$ sert à calculer sa dimension :

$$L^{-1} T^{2}.$$

Unités pratiques d'électricité. — Les unités électriques CGS, telles que nous venons de les définir, n'étant pas d'un emploi très facile à cause de leurs dimensions, on est convenu d'adopter un système d'*unités pratiques* en rapport avec les grandeurs que l'on rencontre ordinairement. Leurs dimensions sont des multiples ou des sous-multiples décimaux des unités CGS. Elles sont déterminées de telle sorte qu'elles satisfassent aux cinq formules qui relient l'intensité, la quantité, la force électromotrice, la résistance et la capacité.

Chacune de ces unités pratiques a reçu un nom spécial. En voici la définition telle qu'elle a été déterminée par la Conférence internationale :

1° *Ampère.* L'unité pratique d'intensité est l'*ampère;* elle est égale au dixième (10^{-1}) de l'unité CGS.

2° *Coulomb.* L'unité pratique de quantité est le *coulomb;* il est égal au dixième (10^{-1}) de l'unité CGS.

3° *Volt.* L'unité pratique de force électromotrice est le *volt;* il vaut cent millions (10^{8}) d'unités CGS.

4° *Ohm.* L'unité pratique de résistance est l'*ohm;* il vaut mille millions (10^{9}) d'unités CGS.

5° *Farad.* L'unité pratique de capacité est le *farad;* il est mille millions de fois plus petit (10^{-9}) que l'unité CGS.

Méthode pour évaluer les ergs en kilogrammètres. — Comme nous l'avons dit plus haut, l'unité de travail est l'erg. En mécanique, on a l'habitude de se servir du kilogrammètre (travail produit par un poids de 1 kilogramme pour un chemin parcouru égal à 1 mètre). Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer les ergs en kilogrammètres, et réciproquement.

Rappelons que l'unité de force est la *dyne*, force qui, agissant sur la masse de 1 gramme, lui communique en une seconde une accélération de 1 centimètre.

Or, à Paris, la pesanteur donne aux corps une accélération de 981 centimètres par seconde. Comme deux forces agissant sur le même corps sont proportionnelles aux accélérations qu'elles lui impriment, on a l'égalité :

$$\frac{1 \text{ dyne}}{\text{force de } 1 \text{ gramme}} = \frac{1 \text{ centimètre}}{981 \text{ centimètres}};$$

d'où

$$1 \text{ dyne} = \frac{1 \text{ gramme}}{981 \text{ centimètres}} \times 1 \text{ centimètre} = \frac{1}{981} \text{ gramme.}$$

Or l'erg est égal à l'unité de force multipliée par l'unité de longueur, c'est-à-dire que :

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyne} \times 1 \text{ centimètre.}$$

On a donc :

$$1 \text{ erg} = \frac{1 \text{ gramme}}{981} \times 1 \text{ centimètre} = \frac{0^{\text{kilog}},001}{981} \times 0^{\text{m}},01$$

$$1 \text{ erg} = \frac{1}{98\,100\,000} \text{ kilogrammètre.} \qquad (1)$$

Nous pouvons tirer de cette relation le moyen d'exprimer en kilogrammètres un travail électrique quelconque calculé avec les unités pratiques que nous avons définies ci-dessus (ampères, volts...).

En effet, nous savons que le travail d'un courant est donné en volt-coulombs par le produit de la force électromotrice en volts par la quantité d'électricité en coulombs.

D'un autre côté, le volt vaut 100 000 000 d'unités CGS, et le coulomb en vaut $\frac{1}{10}$. Leur produit vaudra donc $\frac{100\,000\,000}{10}$ ou 10 000 000 d'unités CGS. En d'autres termes, le volt-coulomb sera égal à 10 000 000 d'ergs.

Remplaçons l'erg par sa valeur en fonction du kilogrammètre, telle que nous l'avons trouvée plus haut :

$$\text{volt-coulomb} = 10\,000\,000 \times \frac{1}{98\,100\,000} \text{ kilogrammètre}$$

$$\text{volt-coulomb} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kilogrammètre.}$$

D'où cette règle :

Pour exprimer en kilogrammètres un travail exprimé en volt-coulombs, il faut diviser le nombre de volt-coulombs par 9,81, *accélération de la pesanteur.*

NOTE III

ÉQUIVALENTS CHIMIQUES ET ÉLECTRO-CHIMIQUES
DES PRINCIPAUX CORPS

NOMS DES CORPS	SYMBOLES	ÉQUIVALENTS	
		CHIMIQUES	ÉLECTRO-CHIMIQUES
Hydrogène	H	1	0,010384
Aluminium	Al	13,7	0,14226
Antimoine	Sb	122	1,26685
Argent	Ag	108	1,12147
Arsenic	As	75	0,77880
Azote	Az	14	0,14538
Baryum	Ba	68,5	0,71130
Bismuth	Bi	210	2,18064
Bore	Bo	11	0,11422
Brome	Br	80	0,83072
Cadmium	Cd	56	0,58150
Calcium	Ca	20	0,20768
Carbone	C	6	0,06230
Chlore	Cl	35,5	0,36863
Chrome	Cr	26,2	0,27206
Cobalt	Co	29,5	0,30631
Cuivre	Cu	31,8	0,33021
Étain	Sn	59	0,61266
Fer	Fe	28	0,29075
Fluor	Fl	19	0,19730
Iode	Io	127	1,31877
Magnésium	Mg	12,2	0,12668
Manganèse	Mn	27,5	0,28556
Mercure	Hg	100	1,03840
Nickel	Ni	29,5	0,30633
Or	Au	197	2,04565
Oxygène	O	8	0,083072
Phosphore	Ph	31	0,32190
Platine	Pt	99	1,02802
Plomb	Pb	103,5	1,07474
Potassium	K	39	0,40498
Silicium	Si	14	0,14538
Sodium	Na	23	0,23883
Soufre	S	16	0,16614
Zinc	Zn	32,5	0,33748

NOTE IV

FORCES ÉLECTROMOTRICES DES DIFFÉRENTES PILES

DÉSIGNATION	COMPOSITION DES ÉLÉMENTS				FORCE électromotrice en VOLTS
Volta	Zinc.	eau acidulée.		Cuivre.	0,085
Daniell.	Zinc amalgamé.	1 ac. sulfurique, 4 eau (en poids).	Sulfate de cuivre saturé.	Cuivre.	1,079
id.	—	1 ac. sulfurique, 12 eau.	—	—	0,978
id.	—	—	Azotate de cuivre saturé.	—	1,000
id.	—	—	Sulfate de cuivre.	—	0,909
id.	—	Sulfate de zinc.	—	—	0,955
id.	—	1 chlorure de sodium, 4 eau.	—	—	1,060
Grove	Zinc amalgamé.	1 ac. sulfurique, 4 eau.	Ac. nitrique fumant.	Platine.	1,956
id.	—	Eau salée.	Ac. nitrique, poids spéc. 1,33.	—	1,904
id.	—	1 ac. sulfurique, 12 eau.	—	—	1,810
id.	—	Sulfate de zinc.	—	—	1,672
Bunsen.	Zinc amalgamé.	Ac. sulfurique étendu.	Ac. nitrique.	Charbon.	1,734
Marié-Davy.	Zinc amalgamé.	1 acide sulfurique, 12 eau.	Pâte de sulf. d'oxydule de mercure.	Charbon.	1,524
id.	—	Ac. sulfurique étendu.	—	—	1,330
Leclanché	Zinc amalgamé.	Sel ammoniac, solut. saturée.	Bioxyde de manganèse.	Charbon.	1,481
De La Rue.	Zinc.	Sel ammoniac, solut. saturée.	Chlorure d'argent.	Argent.	1,059
Trouvé.	Zinc amalgamé.	Ac. sulfurique étendu.	Bichromate de potasse.	Charbon.	2
De Lalande et Chaperon	Zinc amalgamé.	Solution de potasse caustique à 30 ou 40 p. 100.	Oxyde de cuivre.	Cuivre.	0,8 à 0,9

NOTE V

CHALEURS DÉGAGÉES

A LA FORMATION DES PRINCIPALES COMBINAISONS CHIMIQUES

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES (kilogramme-degré) par équivalent du composé. ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISSOUS
	FORMATION DES OXYDES			
. . . . .	$H + O$	9	»	34,5
asse.	$K + O + HO$	56,1	69,8	82,3
de	$Na + O + HO$	40	67,8	77,6
moniaque	$Az + H^3 + 2HO$	35	»	21,0
ux	$Ca + O + HO$	37	73,5	75,05
nésie.	$Mg + O + HO$	29	74,9	»
mine	$Al^2 + O^3 + 3HO$	78,4	$3 \times 65,3$	»
quioxyde de fer (hy-raté)	$Fe + O$	36	34,5	»
oxyde de fer (hy-raté)	$Fe^2 + O^3$	80	$31,9 \times 3$	»
de de nickel (hy-raté)	$Ni + O$	37,5	30,7	»
de de cobalt (hy-raté)	$Co + O$	37,5	32	»
de de zinc (anhy-re)	$Zn + O$	40,5	43,2	»
de de zinc (hydraté)	$Zn + O + HO$	49,5	41,8	»
de de plomb (anhy-re	$Pb + O$	111,5	25,5	»

Les poids des équivalents sont exprimés en grammes ; les calories, en kilogrammes-degrés ; les posants et les composés sont pris dans leur état actuel à + 15°.

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES (kilogramme-degré) par équivalent du composé	
			ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISSOUS
FORMATION DES OXYDES (*suite*)				
Oxyde de plomb (hydraté.	Pb + O + HO	120,5	26,7	»
Protoxyde de cuivre. .	Cu^2 + O	71,4	21,0	»
Bioxyde de cuivre (anhydre)	Cu + O	39,7	19,2	»
Bioxyde de cuivre (hydraté)	Cu + O + HO	48,7	19	»
Protoxyde d'étain (hydraté)	Sn + O	67	34,9	»
Bioxyde d'étain (hydraté)	Sn + O^2	75	67,9	»
Protoxyde de mercure.	Hg^2 + O	208	21,1	»
Bioxyde de mercure. .	Hg + O	108	15,5	»
Protoxyde de manganèse (hydraté). . . .	Mn + O	35,5	47,4	»
Bioxyde de manganèse (hydraté).	Mn + O^2	43,5	58,1	»
Oxyde antimonieux (hydraté)	Sb + O^3	146	88,7	»
Oxyde antimonique. .	Sb + O^5	154	124,3	»
Oxyde d'argent. . . .	Ag + O	116	3,5	»
Sesquioxyde d'argent .	Ag^2 + O^3	240	10,5	»
Protoxyde de platine .	Pt + O	107	7,5	»
Oxyde de bismuth. . .	Bi + O^3	234	68,9	»
FORMATION DES CHLORURES				
Chlorure de potassium.	K + Cl	74,6	105	100,8
— de sodium. .	Na + Cl	58,5	97,3	96,2
— d'ammonium.	Az + H^4 + Cl	53,5	76,7	72,7
— de calcium. .	Ca + Cl	55,5	85,1	93,8
— d'aluminium.	Al^2 + Cl^3	132,9	53,6×3	79,3×3
— de fer	Fe + Cl	63,5	41	50

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉE (kilogramme-degré) par équivalent du compos	
			ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISS
FORMATION DES CHLORURES (*suite*)				
Chlorure de fer (per) .	$Fe^2 + Cl^3$	161,5	32×3	42,6 ×
— de zinc . . .	$Zn + Cl$	68	48,6	56,4
— magnésium .	$Mg + Cl$	47,5	—75,5	93,5
— manganèse. .	$Mn + Cl$	63	56	64
— de plomb . .	$Pb + Cl$	139	42,6	39,2
— de nickel . .	$Ni + Cl$	65	37,3	46,8
— d'étain. . . .	$Sn + Cl$	94,5	40,2	40,6
— — (bi) . .	$Sn + Cl^2$	130	64,6(liq.)	78,7
— d'or (proto) .	$Au^2 + Cl$	232,5	5,8	»
— d'or (per) . .	$Au^2 + Cl^3$	303,5	22,8	27,3
Chlorure de cuivre (proto).	$Cu^2 + Cl$	98,9	35,6	»
Chlorure de cuivre (bi).	$Cu + Cl$	67,2	25,8	31,3
Chlorure de mercure (proto).	$Hg^2 + Cl$	235,5	40,9	»
Chlorure de mercure (bi)	$Hg + Cl$	135,5	31,4	29,8
Chlorure d'argent. . .	$Ag + Cl$	143,5	29,2	»
— de bismuth .	$Bi + Cl^3$	316,5	90,6	»
Protochlorure de platine et de potassium.	$Pt + Cl + K\ Cl$	209,1	22,6	20,9
Bichlorure de platine et de potassium. . . .	$Pt + Cl^2 + K\ Cl$	244,6	44,7	42,3
FORMATION DES BROMURES				
Bromure de potassium.	$K + Br$	119,1	96,4	91
— de sodium. .	$Na + Br$	103	86,7	86,4
— de calcium. .	$Ca + Br$	100	71,8	84
— d'ammonium.	$Az + H^4 + Br$	98	67,2	62,9
— d'aluminium.	$Al^2 + Br^3$	267,4	40,2×3	69,2 ×
— de zinc . . .	$Zn + Br$	112,5	39,1	46,6
— de plomb . .	$Pb + Br$	183,5	34,5	29,5

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES (kilogramme-degré) par équivalent du composé	
			ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISSOUS
FORMATION DES BROMURES (*suite*)				
Bromure d'étain (stanneux).	Sn + Br	139	31,5	»
Bromure d'étain (stannique)	Sn + Br^2	219	50,7	59
Bromure cuivreux. . .	Cu^2 + Br	143,4	26	»
— cuivrique . .	Cu + Br	111,7	17,4	21,5
— mercurique .	Hg + Br	180	25,9	24,25
— d'argent. . .	Ag + Br	188	23,7	»
— d'or (aureux).	Au^2 + Br	277	1,0	»
— d'or (aurique).	Au^2 + Br^3	437	12,1	8,4
FORMATION DES IODURES				
Iodure de potassium. .	K + Io	166,1	80	74,7
— de sodium. . . .	Na + Io	150	68,8	70,1
— d'ammonium . .	Az + H^4 + Io	145	50,6	47,1
— de calcium . . .	Ca + Io	147	53,9	67,7
— d'aluminium. . .	Al^2 + Io^3	408,4	23,4×3	53×3
— de zinc	Zn + Io	159,5	24,6	30,3
— de plomb	Pb + Io	230,5	21	»
— cuivreux.	Cu^2 + Io	190,4	16,5	»
— mercureux. . . .	Hg^2 + Io	327	23,8	»
— mercurique rouge.	Hg + Io	227	17	»
— d'argent.	Ag + Io	236	19,7	14.3
— d'or (proto) . . .	Au + Io	324	— 5,5	»
FORMATION DES CYANURES				
Cyanure de potassium.	Cy + K	65,1	67,6	64,7
— de sodium . .	Cy + Na	49	60,4	59,9
— d'ammonium.	Cy + Az + H^4	44	40,5	36,1
— de calcium. .	Cy + Ca	46	»	57.7
— de zinc. . . .	Cy + Zn	58,5	29,3	»
— de mercure. .	Cy + Hg	126	11,9	10,4
— d'argent. . .	Cy + Ag	134	3,6	»

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES (kilogramme-degré) par équivalent du composé	
			ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISSOUS
FORMATION DES CYANURES (*suite*)				
Cyanure de mercure et de potassium	Hg Cy + K Cy	191,1	8,8	6,2
Cyanure d'argent et de potassium	Ag Cy + K Cy	191,1	11,2	»
FORMATION DES SULFURES				
Sulfure de potassium .	K + S	51,1	51,1	56,2
— sodium . .	Na + S	39	44,2	51,6
— ammonium.	Az + H^4 + S	34	»	28,4
— calcium . .	Ca + S	36	46	49
— fer.	Fe + S	44	11,9	»
— magnésium.	Mg + S	28	39,8	»
— zinc	Zn + S	48,5	21,5	»
— nickel . .	Ni + S	45,5	9,7	»
— plomb . . .	Pb + S	119,5	8,9	»
— cuivre (proto)	Cu^2 + S	72	10,1	»
— cuivre (bi) .	Cu + S	47,5	5,1	»
— mercure . .	Hg + S	116	9,9	»
— argent . . .	Ag + S	124	1,5	5
FORMATION DES PRINCIPAUX ACIDES				
Acide azotique (anhydre)	Az + O^5	54	— 0,6 (gaz) 1,8 (liq.)	14,3 14,3
Acide azotique (hydraté)	Az + O^5 + HO	63	— 0,1 (gaz) 7,1 (liq.)	» 14,3
Acide azotique (2e hydrate)	AzO^6H + 4 HO	99	5,0 (liq.)	»
Acide sulfureux	S + O^2	32	34,6 (gaz)	38,4
Acide sulfurique (anhydre)	S + O^3	40	45,9 (gaz) 51,8 (sol).	» 70,5
Acide sulfurique (monohydraté)	S + O^3 + HO	49	62 (liq.)	70,3

NOMS	ÉLÉMENTS COMPOSANTS	ÉQUIVALENTS CHIMIQUES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES (kilogramme-degré) par équivalent du composé	
			ÉTAT SOLIDE	ÉTAT DISSOUS
FORMATION DES PRINCIPAUX ACIDES (*suite*)				
Acide sulfurique (bihydraté)	$SO^4H + HO$	58	3,1 (liq.)	»
Acide carbonique . . .	$C + O^2$	22	48,5 (gaz)	51,3
— chlorhydrique. .	$H + Cl$	36,5	22 (gaz)	39,3
— bromhydrique. .	$H + Br$	81	9,5 (gaz)	29,5
— iodhydrique. . .	$H + I$	128	— 6,2 (gaz)	13,2
— cyanhydrique. .	Cy (gaz) + H	27	7,8 (gaz)	13,1
— sulfhydrique . .	$H + S$	17	2,3 (gaz)	4,6

FORMATION DES PRINCIPAUX SELS, DANS L'ÉTAT DISSOUS OU PRÉCIPITÉ, AU MOYEN DES ACIDES DISSOUS

NOMS DES BASES	SYMBOLES	NOMBRE DE CALORIES DÉGAGÉES							
		AZOTATES AzO^6H	ACÉTATES $C^4H^4O^4$	OXALATES $\frac{1}{2}C^4H^2O^8$	SULFATES SO^4H	CARBONATES CO^2	CHLORURES HCl	SULFURES HS	CYANURES CyH
Soude	NaO	13,7	13,3	14,3	15,85	10,2	13,7	3,85	2,9
Potasse	KO	13,8	13,3	14,3	15,7	10,1	13,7	3,85	3
Ammoniaque	AzH^3	12,5	12	12,7	14,5	5,3	12,45	3,1	1,3
Chaux	CaO	13,9	13,4	18,5 (pr.)	15,6	9,8 (pr.)	14	3,9	3,2
Baryte	BaO	13,9	13,4	16,7	18,4 (pr.)	11,1	13,85	»	3,2
Protoxyde de fer	FeO	»	9,9	»	12,5	5	10,7	7,3	»
Oxyde de nickel	NiO	»	»	»	13,1	»	11,3	»	»
— de zinc	ZnO	9,8	8,9	12,5	11,7	5,5	9,8	9,6	7,3 (pr.)
— de plomb	PbO (étendu)	7,7	6,5	12,8	10,7 (pr.)	6,7	7,7	13,3	»
— de cuivre	CuO	7,5	6,2	»	9	2,4	7,5	15,8	»
— de mercure	HgO (préc.)	»	3	7	»	»	9,45	24,35	15,5

Les tableaux nous permettent de mesurer la chaleur de combinaison des sels nécessairement employés. En effet, le premier donne la chaleur résultant de la formation des oxydes des métaux. La second indique les chaleurs produites par la combinaison des oxydes avec les acides. En ajoutant les résultats donnés par les deux tableaux, on obtient les chaleurs totales de combinaison des sels. En divisant cette somme par le nombre d'équivalents du métal engagé dans la combinaison, on a la chaleur produite par la formation d'un sel rapportée à un équivalent du métal, ce qui permet de résoudre quelques-uns des problèmes que nous avons indiqués dans la théorie de la pile et de la galvanoplastie.

Prenons par exemple le sulfate de potasse. Le tableau 1 donne 42,4 pour la chaleur de formation de la potasse ; le tableau 2 indique 15,7 pour la combinaison de l'oxyde avec l'acide sulfurique ; total 58 calories pour 1 équivalent de potassium (39 grammes), soit 2 512 calories pour 1 kilogramme du métal.

Pour un sel simple, par exemple le chlorure de sodium, le tableau 1 nous indique la chaleur totale de formation, soit 96,2 pour 1 équivalent (23 grammes) de sodium ; ce qui fait 4 183 calories par kilogramme du métal.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES GÉNÉRAUX, UNITÉS ET MESURES

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES GÉNÉRAUX

DÉFINITIONS

Courant électrique 1
Force électromotrice. — Différence de potentiel. — Quantité. — Intensité. — Résistance 1
Loi de Ohm. 3
Lois de Kirchhoff 4
Résistance d'un conducteur. — Résistance des circuits dérivés. . . . 5
Résistance spécifique et conductibilité. 7
Charge et capacité électriques . . . 11
Rôle de la terre dans les communications électriques 12

ACTIONS CHIMIQUES DES COURANTS

Electrolyse. — Lois de Faraday. . . 13
Théorie de Grotthus et de Faraday. . 14
Actions secondaires. 15

ACTIONS CALORIFIQUES DES COURANTS

Loi de Joule 15
Travail calorifique produit par un courant. 16

MAGNÉTISME

Loi des attractions et répulsions magnétiques 17
Champ magnétique. — Lignes de force. 17

ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Action d'un courant sur un aimant. . 19
Action d'un aimant sur un courant. . 20

ÉLECTRO-DYNAMIQUE

Actions des courants sur les courants 21
Solénoïdes 22
Théorie du magnétisme d'Ampère. . 22
Aimantation par les courants. — Electro-aimants. 23

INDUCTION

Courants d'induction 26
Loi de Lenz. 27
Courants induits d'ordres supérieurs. Extra-courants 28
Lois des courants induits 29
Courants alternatifs et courants continus. 31

CHAPITRE II

UNITÉS

Système C G S d'unités absolues. . . 32
Unités électriques pratiques : Ohm, Ampère, Volt, Coulomb, Farad. . . 33
Volt-Coulomb et Watt. 35
Unité de travail. — Kilogrammètre, Cheval-vapeur 37
Calorie. — Équivalent mécanique de la chaleur 37
Unités photométriques 38
Éclairement. 40

CHAPITRE III

MESURES

GALVANOMÈTRES

Multiplicateur de Schweigger. — Système astatique. — Galvanomètre ordinaire. 42
Galvanomètre à réflexion de Sir W. Thomson. 43
Galvanomètre à réflexion de MM. Deprez et d'Arsonval. 46
Shunts. 49

MESURE DE L'INTENSITÉ

Ampèremètre Deprez et Carpentier. . 52
— Ayrton et Perry 54
— de Sir W. Thomson . . 55
— Richard 59
— Lippmann 59
Recommandations générales pour l'emploi des ampèremètres 61
Graduation des ampèremètres 62
Boîtes de résistances. — Clef d'inversion 63
Graduation des ampèremètres par la méthode de la résistance 65
Electro-dynamomètres. 66
Décompositions électro-chimiques. . 69

MESURE DE LA QUANTITÉ

Décompositions électro-chimiques. — Équivalent électro-chimique. . . . 69
Compteur Edison. 72
— Aron. 73

MESURE DE LA DIFFÉRENCE DE POTENTIEL

Généralités 75
Voltmètre électro-statique de Sir W. Thomson. 76
Méthode de la grande résistance . . . 78
Condensateurs. — Clef de décharge. 79
Condensateurs. — Méthode de Law . 82
Mesures par les galvanomètres étalonnés 85
Voltmètres Deprez et Carpentier, Ayrton et Perry, de Sir W. Thomson, Cardew. 86
Recommandations générales pour l'emploi des voltmètres 90
Graduation des voltmètres. 91

MESURE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

Méthode de M. Lacoine 92
— de Poggendorff. 94
— de la grande résistance. . . 95

MESURE DE LA RÉSISTANCE

Méthode de substitution. 96
— du pont de Wheatstone. . . 97
Comparaison de deux résistances. . . 103
Résistance des liquides 104
— d'un galvanomètre. . . . 105
— intérieure d'une pile . . . 107

MESURE DE LA CAPACITÉ

Emploi des condensateurs. 111

MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Principe de la mesure. 112
Compteur Aron 113
— Frager 113
— Marès 114
Compteur de temps. 117

MESURE DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

Dynamomètres 117
Frein de Prony 118
Compteur de tours 119

MESURES PHOTOMÉTRIQUES

Définitions 119
Photomètres de Bouguer, Foucault et Bunsen. 121
Mesure des foyers puissants. 123
Mesure de l'intensité lumineuse émise sous différents angles. 124
Mesure de l'éclairement. — Photomètre de M. Mascart 125

DEUXIÈME PARTIE

APPAREILS PRODUCTEURS DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

PILES

THÉORIE ET GÉNÉRALITÉS

Théorie de la pile. 129
Résistance intérieure 133
Accouplement des piles 133
Polarisation. 135
Dépolarisation des piles. 137
Amalgamation des zincs. 138

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES DE PILES

Pile de Volta 140
Piles à deux liquides. — Pile Daniell. — Modifications de la pile Daniell. — Piles Callaud. — Piles au sulfate de mercure. 140
Piles à acides. — Piles de Grove, de Bunsen. — Piles aux bichromates de potasse et de soude. — Pile chlorochromique 149
Piles à oxydes. — Piles Leclanché. — Piles de Lalande et Chaperon . . . 157
Piles à chlorures 164
Pile Maiche. 167
Piles thermo-électriques. 169

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR L'EMPLOI DES PILES

Chaleur dégagée par les actions chimiques des piles. (Exemples.) . . . 172
Travail fourni par les piles. (Exemples.) 173
Groupement des éléments d'une pile. 173
Choix des piles suivant le travail à produire 183
Calcul de la force électromotrice d'un élément. (Exemples.) 184
Prix de revient. (Exemples.). 186

CHAPITRE II

MACHINES ÉLECTRIQUES

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

Théorie de la machine électrique. . . 190
Description de l'anneau Gramme. . . 191
Collecteur. 194
Balais 195
Magnétos et dynamos. 196
Différents modes d'excitation 197
Machines multipolaires 198
Machines à courant continu, à courants redressés et à courants alternatifs. 198
Machines à électros mobiles. 201
Réversibilité des machines électriques. 202
Lois de l'action des machines électriques. — Influence de la vitesse. 203
Construction des électro-aimants et des bobines induites. 204
Calage des balais. 207
Pertes d'énergie dans les machines. 210
Rendement industriel. (Mesures.) . . 211
Rendement électrique. 214
Etude des différents modes d'excitation 215
Caractéristiques. 218
Couplage des machines. 222
Comparaison entre les piles et les machines. 227

DESCRIPTIONS DES MACHINES

Machines à courant continu. — Dynamos Gramme. 228
Machines dérivées de la dynamo Gramme. — Dynamos Shuckert, Henrion, Manchester, Brown et Phœnix. 231
Dynamos Siemens 234
Dynamos Edison 237
— Thury. 238
— Rechniewsky 240
Dynamos Siemens à pôles intérieurs. 240
— Desroziers. 242
Machines à courants redressés. — Dynamo Brush 249
Dynamos Thomson-Houston. 252
Machines à courants alternatifs. — Machine magnéto de Méritens. . . 258
Dynamo Gramme. 260
— Siemens. 261
— Ferranti. 262
— Zipernowsky. 264
— Stanley 265
Installation et entretien des machines. 266

CHAPITRE III

ACCUMULATEURS

Notions générales. 269
Accumulateur Planté 271
Accumulateur Legay 276
Accumulateurs au plomb du système Faure, Faure-Volkmar ou E P S, Julien, Gadot, Laurent-Cély 277
Capacité des accumulateurs au plomb. 282
Puissance des accumulateurs au plomb 283
Accumulateurs au cuivre Conmelin, Desmazures et Bailhache 284
Conditions générales d'emploi. . . . 285
Installation et entretien. 289
Applications à l'industrie : Tramways, embarcations, éclairages. 290

TROISIÈME PARTIE

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

FOYERS LUMINEUX

FOYERS LUMINEUX

Arc électrique. 297
Charbons électriques 300
Régulateur Serrin. 302
Lampe différentielle Siemens 304
Régulateur Gramme. 307
— Japy-Helmer. 308
— Pieper 310
— Brush. 311
— Bardon. 314
— Piette et Krizik 315
— Cance. 317
— Thomson-Rice 321
Bougie Jablochkoff 323
Chandeliers. 324
Dépense de force motrice. (Régulateurs, bougies.) 327
Lampes à incandescence, considérations générales 328
Lampes à incandescence à l'air libre. 328
— dans le vide. 329
Nature du filament 329
Intensité lumineuse de la lampe. . . 329
Durée des lampes. 330
Lampe Edison 331
— Swan 334
— Weston 335
— Woodhouse et Rawson. . . . 336
— Gérard 337
— à faible résistance 338
— Bernstein. 339
— Siemens. 340

CHAPITRE II

INSTALLATION DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Avantages de la lumière électrique. . 341
Choix des lampes suivant les applications. 342
Distribution de la lumière. 344
Montage des foyers électriques : Régulateurs. — Lampes à incandescence. — Combinaison de régulateurs et lampes à incandescence . 345
Production du courant. 355
Calcul des conducteurs. — Table générale. (Exemples) 357
Calcul de la force motrice. 361

APPAREILS ACCESSOIRES D'UNE INSTALLATION ÉLECTRIQUE

Voltmètres, ampèremètres, compteurs. 362
Régulateurs de courant 363
Résistances. 365
Indicateur de marche du courant . . 366
Parafoudres. 366
Coupe-circuit de sûreté 369
Indicateur d'isolement à la terre. . . 371
Interrupteurs. — Commutateurs . . . 372
Tableaux de distribution. 374
Instructions sur l'installation des foyers électriques 376

INSTALLATIONS PRIVÉES

Canalisation 377
Eclairage des usines. 380
— des magasins 383
— des établissements publics. 387
— des théâtres. 389
— des gares de chemins de fer 395
Eclairage des voitures de chemins de fer. 396
— des mines. 399
— des navires 400
— des habitations particulières 406

PRIX DE REVIENT DE L'ÉCLAIRAGE ELECTRIQUE

Dépenses de premier établissement. 409
Frais d'entretien 410
Exemples. 412
Variation du prix avec la durée de l'éclairage 417
Comparaison avec le gaz. 417

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ PAR LES STATIONS CENTRALES

Distributions directes : à différence de potentiel constante, à intensité constante. 420
Distributions indirectes, par accumulateurs. 420
Distributions par transformateurs. — Descriptions de transformateurs : Gaulard et Gibbs, Zipernowsky, Swinburne, Ferranti, Westinghouse . . . 426
Montage des transformateurs. . . . 431
Précautions 432
Station des Halles. 433
— de l'avenue Trudaine 438
— de la place Clichy. 442
Canalisations aériennes 444
— souterraines 446
Prix d'une canalisation 455
Résultats économiques des stations centrales 457

QUATRIÈME PARTIE

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE LA FORCE

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'UNE TRANSMISSION

Réversibilité des machines électriques. 461
Expériences de Vienne, 1873. 462
Force contre-électromotrice de la réceptrice. 463
Travail utile 464

Rendement électrique d'une transmission 465
Rendement mécanique 467
Moyens de remédier à l'augmentation de la distance. 468

PROPRIÉTÉS DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Rendement d'une réceptrice 471
Sens de rotation d'une génératrice et d'une réceptrice. 472
Calage des balais 474
Renversement de marche 475
Constance de la vitesse 479
Commutateur de mise en marche . . 481

DESCRIPTION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Moteur Trouvé 482
— Siemens. 483
— Reckenzaun 483
— Immisch. 484
— Daft. 485
— Sprague. 486
— Van Depoele. 486
— Thomson-Houston 487

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA TRANSMISSION DE LA FORCE

Calcul d'une transmission électrique. 488
Appareils de levage 491
Machines-outils 493
Ventilation des édifices 494
Applications dans les mines. 495
Distribution de la force par les stations centrales 499
Chemins de fer électriques. — Puissance de traction. 501
Bateaux électriques 509

TRANSPORT DE LA FORCE A GRANDE DISTANCE

Expériences de Marcel Deprez 510
— M. H. Fontaine. . . . 515
— M. Brown 516

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

Théorie. 519
Moteurs à champ constant. 520
— — alternatif. 521
— — tournant. 523
Expériences de Francfort.. 525

CINQUIÈME PARTIE

GALVANOPLASTIE ET ÉLECTRO-MÉTALLURGIE

CHAPITRE PREMIER

GALVANOPLASTIE

MODELAGE

Fabrication des moules. 533
Disposition des moules dans les bains. 537
Dépôts adhérents. — Décapage des pièces 539

COMPOSITION DES BAINS

Argenture. 539
Dorure 545
Platinage. 547
Dépôt de l'aluminium. 547
Nickelage. 547
— des rouleaux d'impression. 552
Dépôt de cobalt. 553
Etamage 554
Aciérage des planches de cuivre gravées 555
Dépôt du fer 555
Electrotypie. 556
Cuivrage 557
Cuivrage du fer et de la fonte. (Procédé Oudry.) 559
Cuivrage adhérent du fer et de la fonte 561
Décapage des métaux 566

PRODUCTION ET DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

Procédé de la pile simple 566
Production du courant par pile ou machine 569
Calcul de la source d'électricité . . . 569
Dépense de travail dans les bains. (Exemples.). 571
Actions secondaires. Anodes solubles. 572
Influence des conducteurs. 576
Intensité du courant, dimensions et dispositions des électrodes. 577

CHAPITRE II

ÉLECTRO-MÉTALLURGIE

Raffinage des métaux 581
Expériences de M. Gramme 582
Traitement des mattes de cuivre. . . 583
Raffinage du plomb. Procédé Keith. . 588
Métallurgie de l'aluminium. (Procédés Kleiner, Minet, Cowles, Berg.). . . 589
Fabrication du magnésium. 597
Soudure électrique des métaux. . . . 598

SIXIÈME PARTIE

TÉLÉPHONIE

THÉORIE ET DESCRIPTION DES TÉLÉPHONES

Théorie du téléphone 603
Téléphones magnétiques. — Système Bell. 605
Téléphone Ader. 606
Téléphones à piles. — Microphones. . 607
Microphone de Hughes 608
Transmetteur à charbon d'Edison . . 609
Transmetteur Ader 610
Poste téléphonique Ader. 610
Transmetteur Blake. 612
Installation d'un poste téléphonique 614

RÉSEAUX ET LIGNES TÉLÉPHONIQUES

Installation des lignes souterraines. . 617
Bureau central avec tableau à Jack Knives 617
Bureau central avec tableaux multiples 622
Installations privées. 630
Lignes aériennes 633
Phénomènes d'induction. 634
Système Van Rysselberghe 638

APPENDICE

Tableau de la résistance des métaux et alliages usuels à 0° centigrade . 641
Tableau de la résistance des fils et des barres de cuivre recuit à 0° centigrade. 642
Unités électriques. 644
Tableau de la force électromotrice des différentes piles. 651
Tableau des équivalents chimiques et électro-chimiques des principaux corps 652
Tableau des chaleurs dégagées par la formation des principales combinaisons chimiques 653
Tableau de la formation des principaux sels, dans l'état dissous ou précipité, au moyen des acides dissous. 659

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

CATALOGUE

DE

LIVRES SUR L'ÉLECTRICITÉ

PUBLIÉS PAR

LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie

15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue complet est envoyé franco sur demande.

Traité d'électricité et de magnétisme.

Traité d'électricité et de magnétisme. Théorie et applications, instruments et méthodes de mesures électriques. Cours professé à l'Ecole supérieure de télégraphie, par M. VASCHY, ingénieur des télégraphes, examinateur d'entrée à l'Ecole polytechnique. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. . . . . 25 fr.

Traité pratique d'électricité.

Traité pratique d'électricité à l'usage des ingénieurs et constructeurs. Théorie mécanique du magnétisme et de l'électricité, mesures électriques, piles, accumulateurs et machines électrostatiques, machines dynamo-électriques génératrices, transport, distribution et transformation de l'énergie électrique, utilisation de l'énergie électrique, par FÉLIX LUCAS, ingénieur en chef des ponts et chaussées, administrateur des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8°, avec 278 figures dans le texte. 15 fr.

Électricité industrielle.

Traité pratique d'électricité industrielle. Unités et mesures; piles et machines électriques; éclairage électrique; transmission électrique de la force; galvanoplastie et électro-métallurgie; téléphonie, par E. CADIAT et L. DUBOST. 4e édition. 1 volume grand in-8°, avec 257 gravures dans le texte, relié . . . . . 16 fr. 50

Manuel pratique de l'Électricien.

Manuel pratique de l'électricien. Guide pour le montage et l'entretien des installations électriques, par E. CADIAT. 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte, relié . . . . . 7 fr. 50

Électricité industrielle.

Electricité industrielle. Production et applications. Induction électromagnétique : méthodes de mesures; étude théorique et expérimentale des machines électriques : piles : canalisations électriques : application à l'électrolyse, à la métallurgie, au transport de la force et à la production de la lumière, distribution de l'énergie électrique. Cours professé à l'Ecole centrale des arts et manufactures. par D. MONNIER, ingénieur. 1 volume grand in-8°, avec 388 figures dans le texte . . . . . 20 fr.

L'Électricité dans l'industrie.

L'Electricité dans l'industrie. Rapport présenté à l'Association des anciens élèves des écoles supérieures de commerce et d'industrie de Rouen, par RAOUL LEMOINE, ingénieur. 1 volume in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte . . . . . 6 fr.

L'Année électrique.

L'Année électrique, ou Exposé annuel des travaux scientifiques, des inventions et des principales applications de l'électricité à l'industrie et aux arts, par PH. DELAHAYE. 1 volume in-12 par année : Prix de chaque volume. . . . . 3 fr. 50

La 1re année a paru en 1885.

Pile électrique.

Traité élémentaire de la pile électrique, par ALFRED NIAUDET. 3e édition revue par HIPPOLYTE FONTAINE, et suivie d'une notice sur les accumulateurs, par E. HOSPITALIER. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte. 7 fr. 50

Électrolyse.

Electrolyse : renseignements pratiques sur le nickelage, le cuivrage, la dorure, l'argenture, l'affinage des métaux et le traitement des minerais au moyen de l'électricité, par HIPPOLYTE FONTAINE. 2e édition. 1 volume grand in-8°, avec figures dans le texte, relié. . . . . 15 fr.

Électrolyse.

Etude sur le raffinage électrolytique du cuivre noir, par HUGON. 1 brochure grand in-8°. . . . . 1 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, par R.-V. PICOU, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 198 gravures dans le texte . . . . . 12 fr. 50

Les Moteurs électriques à champ magnétique tournant.

Les moteurs électriques à champ magnétique tournant, par R.-V. PICOU. *Supplément au Traité des machines dynamo-électriques du même auteur.* 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte. . . . . 1 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques par SYLVANUS THOMPSON, traduit par E. BOISTEL. 1 volume grand in-8°, avec 246 gravures dans le texte. (*Epuisé.* — Une 2e édition est en préparation.)

Machines dynamo-électriques.

La machine dynamo-électrique, par FRŒLICH, traduit de l'allemand par E. BOISTEL. 1 volume grand in-8°, avec 62 figures dans le texte . 10 fr.

Éclairage à l'électricité.

Eclairage à l'électricité, renseignements pratiques, par HIPPOLYTE FONTAINE. 3e édition entièrement refondue. 1 volume grand in-8°, avec 326 figures dans le texte. . . . . 16 fr.

Éclairage électrique.

Eclairage électrique de l'Exposition universelle de 1889. Monographie des travaux exécutés par le syndicat international des électriciens, par HIPPOLYTE FONTAINE. 1 volume in-4°, avec 29 planches tirées à part et 32 gravures dans le texte, relié . . . . . 25 fr.

Électricité.

Manuel élémentaire d'électricité, par FLEEMING JENKIN, professeur à l'Université d'Edimbourg; traduit de l'anglais par N. DE TÉDESCO. 1 volume in-12, avec 32 gravures . . . . . 2 fr.

Électricité.

Traité général des applications de l'électricité, par GLOESENER. Tome Ier. 1 volume grand in-8°, contenant 17 planches . . . . . 15 fr.

Problèmes sur l'électricité.

Problèmes sur l'électricité. Recueil gradué comprenant toutes les parties de la science électrique, par le Dr ROBERT WEBER, professeur à l'académie de Neuchâtel. 2e édition. 1 volume in-12, avec figures dans le texte. 6 fr.

Chemin de fer électrique.

Chemin de fer électrique des boulevards, à Paris, par CHRÉTIEN. 1 brochure in-4°, avec 4 gravures . . . . . 2 fr.

Traction électrique.

Etude sur la traction électrique des trains de chemin de fer, par H. BONNEAU, ingénieur des ponts et chaussées, sous-chef de l'exploitation des chemins de fer P.-L.-M., et E. DESROSIERS, ingénieur civil des mines. 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte . . . . . 1 fr.

Navigation électrique.

La navigation électrique, par GEORGES DARY. 1 volume in-12, avec 18 figures . . . . . 1 fr. 50

Transmissions électriques.

Transmissions électriques, renseignements pratiques, par H. FONTAINE. 1 volume grand in-8°, avec gravures. . . . . 3 fr.

Accumulateurs électriques.

Recherches théoriques et pratiques sur les accumulateurs électriques, par RENÉ TAMINE. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte. 7 fr. 50

L'Accumulateur voltaïque.

Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par EMILE REYNIER. 1 volume grand in-8°, avec 62 gravures dans le texte et un portrait de M. Gaston Planté . . . . . 6 fr.

Les Voltamètres-régulateurs.

Les voltamètres-régulateurs zinc-plomb. Renseignements pratiques sur l'emploi de ces appareils, leur combinaison avec les dynamos et les circuits d'éclairage, par EMILE REYNIER. 1 brochure in-8°, avec gravures et schémas d'installation . . . . . 1 fr. 25

Le Téléphone.

Le Téléphone, par WILLIAM-HENRI PREECE, électricien en chef du *British Post-Office* et JULES MAIER, docteur ès sciences physiques. 1 volume grand in-8°, avec 290 gravures dans le texte . . . . . 15 fr.

Télégraphie sous-marine.

Traité de télégraphie sous-marine. — Historique. — Composition et fabrication des câbles télégraphiques. — Immersion et réparation des câbles sous-marins. — Essais électriques. — Recherche de défauts. — Transmission des signaux. — Exploitation des lignes sous-marines, par WUNSCHENDORFF, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 469 gravures dans le texte . . . . . 40 fr.

Tirage des mines par l'électricité.

Le tirage des mines par l'électricité, par PAUL-F. CHALON, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-18 jésus, avec 90 figures dans le texte. Prix, relié. . . . . 7 fr. 50

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

OCT 5 - 1980